

Wasserdampfdurchlässigkeit von Komposit-Hohlisolatoren

Vom Fachbereich 18
-Elektrotechnik und Informationstechnik-
der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

Dipl.-Ing. Nicole Möhring
geb. am 28.06.1976 in Wolfsburg

Referent: Prof. Dr.-Ing. V. Hinrichsen

Koreferent Prof. Dr.-Ing. M. Kurrat

Tag der Einreichung: 13. Oktober 2009

Tag der mündlichen Prüfung: 03. Februar 2010

D 17

Darmstädter Dissertationen

Das IGF-Vorhaben 14121 N der Forschungsvereinigung Elektrotechnik beim ZVEI e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Hochspannungstechnik der Technischen Universität Darmstadt.

Mein erster Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. V. Hinrichsen, der die Idee zu diesem Projekt hatte und es in jeder Hinsicht immer unterstützt hat.

Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Kurrat danke ich für die bereitwillige Übernahme des Korreferats verbunden mit der gewissenhaften Durchsicht der Arbeit sowie für seine Anmerkungen. Dass auch auf diese Art die Verbindung zu meiner Ursprungsuniversität und meinem »alten Institut« an der Technischen Universität Braunschweig bestehen bleibt, freut mich besonders.

Des Weiteren danke ich der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) für die finanzielle Unterstützung des Projektes. Mein Dank gilt auch allen Mitgliedern des Arbeitskreises des AIF-Forschungsprojektes 14121 N für die vielen hilfreichen Diskussionen, die bereitgestellten Informationen und die aktive Begleitung dieses Forschungsprojektes. In diesem Zusammenhang danke ich besonders Herrn Haupt von der MPA Darmstadt. Die von ihm durchgeführten Versuche zur mechanischen Belastbarkeit von Komposit-Hohlisolatoren waren ein wichtiger Bestandteil dieses Projektes.

Den Werkstattmitarbeitern des Fachgebiets Hochspannungstechnik danke ich für ihre Unterstützung, die erfolgreiche Umsetzung meiner Ideen und das konstruktive Engagement. Insbesondere danke ich allen Beteiligten für die Vorsicht beim Bestücken der Versuchskammern.

Ebenso danke ich allen Studenten, die in Form von Studien- oder Diplomarbeiten oder auch durch die umfangreichen HiWi-Tätigkeiten an diesem Projekt beteiligt waren und zu seinem Gelingen beigetragen haben.

Meinen Kollegen, insbesondere unserer »ersten Generation«, möchte ich für die gute Zusammenarbeit während meiner Zeit am Fachgebiet danken. Viele gute Ideen sind bei unseren gemeinsamen Gesprächen entstanden und einige Dinge wären ohne die Unterstützung durch Kollegen nur schwer möglich gewesen.

Ich danke allen Verwandten, Freunden und Bekannten, die sich die Mühe gemacht haben, mein Manuskript vorab zu lesen und danke ihnen für ihre vielen fachlichen oder manchmal auch weniger fachlichen Rückmeldungen.

Ganz besonders möchte ich meiner Familie danken.

Meinen Eltern danke ich für Ihre ständige Unterstützung und auch dafür, dass sie mir mein Studium und damit auch meine Promotion ermöglicht haben.

Auch meinem Bruder danke ich für seine Unterstützung und die guten fachlichen Kommentare.

Mein besonderer Dank gilt meinem Mann Arne, für seine Unterstützung, sein Verständnis, seine Bereitschaft, sich mit diesem ihm fremden Thema zu beschäftigen und den Rückhalt, den er mir beim Entstehen dieser Arbeit gegeben hat.

Schriesheim, im Februar 2010

Nicole Möhring

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XIII
Übersicht	XV
Abstract	XVI
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Forschungsziel	1
1.2 Einordnung der Arbeit in das Gesamtforschungsprojekt	3
1.3 Struktur der Arbeit	5
2 Komponenten und Materialien in Verbundisolatoren	7
2.1 Komposit-Hohlisolatoren	7
2.2 Glasfaserverstärkter Kunststoff	8
2.2.1 Glasfasern	8
2.2.2 Epoxidharz	11
2.2.2.1 Glasübergang	12
2.2.3 GFK als Isolatorenmaterial	15
2.2.3.1 GFK-Stäbe für Komposit-Langstabisolatoren	15
2.2.3.2 GFK-Rohre für Komposit-Hohlisolatoren	16
2.3 Silikonelastomer	18
2.4 O-Ringe	20

3	Theoretische Grundlagen zur Wasserdampfdurchlässigkeit	23
3.1	Wasserdampfdurchlässigkeit des Gesamtsystems	23
3.2	Permeation	25
3.3	Diffusion	26
3.4	Die Fickschen Gesetze	28
3.4.1	Der Fall einer Platte	30
3.4.2	Der Fall eines Zylinders	31
3.4.3	Löslichkeit	32
3.4.4	Permeation von Dämpfen	33
3.5	Nicht-Ficksche Diffusion	33
3.6	Temperaturabhängigkeit der Permeation	35
3.7	Diffusionswiderstandszahl	37
3.8	Permeations- und Diffusionsraten	38
3.8.1	Permeationsraten aus Komplettmessung	39
3.9	Literaturwerte zur Diffusion und Permeation	39
3.9.1	Bisherige Messungen am Gesamtsystem Komposit-Hohlisolator	39
3.9.2	Eine Diffusionswiderstandszahl aus der Bauphysik	40
3.9.3	Weitere Literaturwerte und Erkenntnisse	41
3.9.4	Diskussion der Literaturwerte	42
4	Versuchseinrichtungen und -verfahren	45
4.1	Wasser	45
4.2	Stablagerungseinheit	46
4.3	Rohrlagerungseinheit	48
4.4	Versuchskammern	49
4.4.1	Gesamtaufbau	49
4.4.2	Die Messung der eingedrungenen Wassermenge	51
4.4.2.1	Die Gewichtsmessung des eingebrachten Trockenmittels	53
4.4.3	Messtechnische Erfassung	55
4.4.3.1	Die Erfassung der Gewichtswerte	55
4.4.4	Die Erfassung der einzelnen Strecken, über die Wasser eindringt	57
4.5	Mechanische Belastung	58

4.5.1	Untersuchung der Helium-Leckrate	63
5	Untersuchungen an Materialproben	65
5.1	Untersuchungen an Stäben	65
5.2	Untersuchungen an Rohrabchnitten	67
5.3	Das Dichtsystem des Deckels	72
5.4	Die Kabeldurchführung	75
6	Untersuchungen an Hohlisolatoren	79
6.1	Randbedingungen	79
6.1.1	Klima	79
6.1.2	Prüfkörper	80
6.1.3	Versuchsdauer	81
6.2	Die erste Charge neuwertiger Prüfkörper	82
6.2.1	Vorkommnisse während der Prüfung	82
6.2.2	Veränderungen als Folge der Prüfung der ersten Charge	86
6.2.3	Erläuterungen zur Auswertung der Messwerte	87
6.2.4	Ergebnisse der ersten Charge	88
6.3	Die zweite Charge neuwertiger Prüfkörper	90
6.3.1	Auswertung der Messergebnisse	91
6.3.1.1	Möglicher Einfluss der Kammertemperatur	93
6.3.1.2	Möglicher Einfluss der Kammerfeuchte	95
6.3.1.3	Beachtung der Dichtigkeitmessungen der Einzelaufbauten	96
6.4	Mechanisch vorbelastete Prüfkörper	99
6.5	Prüfkörper mit vereinfachtem Versuchsverfahren	102
6.5.1	Vereinfachung des Versuchsverfahrens	102
6.5.2	Messergebnisse	105
6.6	Zusammenfassung der Messergebnisse	106
7	Folgerungen aus den Untersuchungen	109
7.1	Die Beschleunigung	109
7.1.1	An dickwandigen Komposit-Hohlisolatoren	110

7.1.2	An dünnwandigen Komposit-Hohlisolatoren	112
8	Zusammenfassung und Ausblick	115
	Literaturverzeichnis	119
	Anhang	127
A	Bilder der Versuchsaufbauten	129
A.1	Die Klimakammern	129
A.2	Die Probekörper	131
A.3	Der servohydraulische Prüfstand	132
B	Veröffentlichungen	133
C	Studentische Arbeiten	135

Abbildungsverzeichnis

1.1	Der schematische Aufbau eines Komposithohlisolators im Querschnitt.	2
2.1	Das Düsenziehverfahren zur Herstellung von Endlostextilglasfasern [ZOR 03].	9
2.2	Die Epoxidgruppe.	11
2.3	Darstellung der thermischen Relaxation bei einer stufenförmigen Abkühlung im Bereich des Glasübergangs [USE 99].	14
2.4	Das Strangziehverfahren zur Herstellung von GFK-Stäben.	15
2.5	Die Definition der Wickelwinkel [SCH 75].	16
2.6	Das Wickelverfahren zur Herstellung von GFK-Rohren [SCH 75]. .	17
2.7	Die Siloxaneinheit mit dem gebräuchlichsten Rest, der Methylgruppe.	19
2.8	Dichtsystem des Deckels mit O-Ring.	21
3.1	Die möglichen Eindringstrecken für Feuchtigkeit in einen Komposit-Hohlisolator.	24
3.2	Die Permeation und ihre Zwischenschritte am Beispiel einer Wand. .	25
3.3	Verschiedene Verläufe der Diffusion anhand der Kurven der normierten Massenaufnahme [NEO 96].	35
4.1	Eine beheizbare Lagerungseinheit für GFK-Stäbe.	47
4.2	Eine beheizbare Lagerungseinheit für GFK-Rohrabschnitte.	48
4.3	Aufbau der Versuchskammern.	50
4.4	Aufbau des Gewichtsmess- und Entlastungssystems.	53
4.5	Durchführung für Messkabel und Spannungsversorgung in das Innere des Komposit-Hohlisolators.	54
4.6	Ablaufdiagramm der elektronischen Messdatenerfassung.	56

4.7	Beziehung zwischen den Biegebelastungen nach [IEC 61462].	60
4.8	Komposit-Hohlisolator mit servohydraulischer Prüfmaschine.	62
5.1	Die relative Gewichtszunahme der reinen GFK-Stäbe als Durchschnittswerte aller gemessenen Stäbe.	66
5.2	Die relative Gewichtszunahme von GFK-Rohrabschnitten bei 75 °C.	69
5.3	Die relative Gewichtszunahme von GFK-Rohrabschnitten bei 75 °C und 20 °C im Vergleich.	70
5.4	Eine verschweißte, mit Trockenmittelbeuteln befüllte Armatur.	73
5.5	Eine Kabeldurchführung im Einzelmessaufbau und mehrere im Exsikator zur Ofenlagerung.	76
5.6	Der Gewichtsanstieg der Aluminiumröhren mit Durchführungen.	77
6.1	Die unsilikonisierten Prüfkörper.	80
6.2	Optische Eindrücke nach der Entnahme der Prüfkörper von Charge 1 aus Kammer 1.	82
6.3	Oberflächenuntersuchung an Prüfkörpern der Charge 1 mit Aceton.	84
6.4	Diagramm der Messergebnisse eines kurzen dünnwandigen Prüfkörpers der ersten Charge.	87
6.5	Diagramm der Messergebnisse der Prüflinge 3 und 5 aus der zweiten Charge.	90
6.6	Auswertung der Messergebnisse einer Kammer der zweiten Charge neuwertiger Prüfkörper.	92
6.7	Alle Messwerte nach Prüfkörper und mechanischer Belastung getrennt.	107
A.1	Der Blick von oben in eine Versuchskammer mit Prüflingen.	129
A.2	Die Heizwendel in einer leeren Versuchskammer.	129
A.3	Die Heizwendel.	130
A.4	Mehrere Prüflinge auf dem Standtisch im Reservoir beim Darüberheben der Kammer.	130
A.5	Unsilikonisierter langer Komposit-Hohlisolator.	131

A.6	Zwei kurze gestapelte Komposit-Hohlisolatoren, einer silikonisiert, einer unsilikonisiert.	131
A.7	Komposit-Hohlisolator mit servohydraulischer Prüfmaschine.	132
A.8	Integrale Heliumlecksuche.	132

Tabellenverzeichnis

3.1	Unterscheidungen der Diffusionsarten nach Formel 3.20.	34
3.2	Vergleich von Diffusionskoeffizienten aus der Literatur.	43
3.3	Vergleich von Werten bezüglich der eindringenden Feuchtigkeitsmenge aus der Literatur.	43
4.1	Werte für die mechanische Belastung der Komposit-Hohlisolatoren.	62
5.1	Rohrarten der untersuchten Abschnitte.	68
5.2	Durchlässigkeit der O-Ring-Dichtung zwischen Armatur und Deckel.	73
5.3	Durchlässigkeit der Messkabel-Durchführungen.	78
6.1	Ergebnisse der ersten Charge von Prüfkörpern.	89
6.2	Ergebnisse der ersten Charge von Prüfkörpern in Matrixform.	89
6.3	Ergebnisse der zweiten Charge von Prüfkörpern.	93
6.4	Ergebnisse der zweiten Charge von Prüfkörpern in Matrixform.	93
6.5	Ergebnisse der zweiten Charge von Prüfkörpern in Matrixform bezogen auf die Prüfkammern.	94
6.6	Ergebnisse der zweiten Charge von Prüfkörpern in Matrixform bezogen auf die Prüfkammern, abzüglich der Wassermengen durch Deckel und Durchführung.	96
6.7	Ergebnisse der mechanisch vorbelasteten Prüfkörper.	99
6.8	Ergebnisse der mechanisch vorbelasteten Prüfkörper in Matrixform bezogen auf die mechanische Vorbelastung und die Rohrlänge, abzüglich der Wassermengen durch Deckel und Durchführung.	100

6.9	Ergebnisse aller dickwandigen Prüfkörper in Matrixform bezogen auf die mechanische Vorbelastung und die Rohrlänge, abzüglich der Wassermengen durch Deckel und Durchführung.	101
6.10	Ergebnisse der Prüfkörper nach vereinfachtem Verfahren.	105
7.1	Abschätzung für die durch das GFK in einen dickwandigen Komposit-Hohlisolator eindringende Wassermenge in der »worst-case-Betrachtung« bei verschiedenen Umgebungstemperaturen.	113
7.2	Abschätzung für die durch das GFK in einen dünnwandigen Komposit-Hohlisolator eindringende Wassermenge in der »worst-case-Betrachtung« bei verschiedenen Umgebungstemperaturen.	114

Übersicht

In der vorliegenden Arbeit wird über die Wasserdampfdichtigkeit von Komposit-Hohlisolatoren berichtet. In der Hochspannungstechnik gewinnen diese aufgrund ihrer vielen Vorteile gegenüber Keramik-Hohlisolatoren immer größeren Einfluss. Da die eingesetzten Materialien jedoch organisch und somit nicht wasserdampfdiffusionsdicht sind, stellt sich die Frage, ob die eindringenden Wassermengen im Laufe der Lebensdauer der Isolatoren eine Gefahr darstellen.

Die hier geschilderten Untersuchungen sollen die jahrzehntelangen positiven Erfahrungen aus der Praxis auch wissenschaftlich belegen. Dafür werden Untersuchungen am Gesamtsystem von Komposit-Hohlisolatoren, wie sie in industriellen Anwendungen üblich sind, vorgenommen. Diese müssen auf Grund der langen Lebensdauer dieser Geräte zeittraffend vorgenommen werden. Hierfür wird eine geeignete Versuchstechnik entwickelt, verbessert und bewertet.

Da aus Gründen der Kostenersparnis auch vielfach über eine Verringerung der Wanddicke von Komposit-Hohlisolatoren nachgedacht wird, wird auch dieser Gesichtspunkt untersucht. Es zeigt sich jedoch keine signifikante Abhängigkeit der eindringenden Wassermenge von der untersuchten Wanddicke.

Des Weiteren sind Komposit-Hohlisolatoren während ihrer Lebensdauer vielfältigen mechanischen Belastungen ausgesetzt. Deshalb wird auch deren Auswirkung auf die Dichtigkeit untersucht. Hierzu werden Hohlisolatoren erst mechanisch vorgeschädigt und danach auf Ihre Dichtigkeit hin untersucht. Auch dies bewirkt keine signifikanten Änderungen.

Abschließend werden die gewonnenen Erkenntnisse zur Wasserdampfdichtigkeit mit Hilfe mathematischer Zusammenhänge auf die Lebensdauer von Komposit-Hohlisolatoren ausgedehnt. Hierbei zeigt sich, dass die Feuchtemengen, die in die untersuchten Hohlisolatoren eindringen, bei einer üblichen Ausstattung mit Trockenmittel, gut beherrschbar sind und die Lebensdauer nicht verringern.

Abstract

Water vapor permeability of hollow composite insulators

This work reports on the water vapor impermeability of composite hollow insulators. These are gaining more and more influence because of their advantages over porcelain insulators. However, because the used materials are organic and in result not water vapor proof, the question arises, if the permeating amount of water might be a danger over the course of a lifetime of a composite hollow insulator.

The described experimental series are to prove the positive practical experience of decades scientifically. Therefore, complete systems of the composite hollow insulator will be examined, as they are commonly used in the industry. This has to be done in accelerated tests due to the long durability of this hardware. For this the adequate experimental technology is developed, improved and evaluated.

Due to cost optimization the reduction of the wall thickness of composite hollow insulators is often considered. This is also tested, however it can be shown that there is no significant dependency between the amount of permeating water and the wall thickness.

Furthermore, composite hollow insulators are exposed to varied mechanical loads. Therefore the effect of this on the impermeability is also tested, stressing the hollow insulators mechanically before testing them again for permeability. This also does not show significant variation.

In conclusion, the gained results for water vapor impermeability are expanded to the entire lifetime of composite hollow insulators with mathematical correlations. Hereby it is shown, that the amount of water penetrating the researched composite hollow insulators can easily be controlled by the common amount of drying agent and does not reduce their durability.

1 Einleitung

In diesem Kapitel wird kurz auf die Motivation der Arbeit, die grundsätzliche Problemstellung und mögliche Lösungsansätze eingegangen. Außerdem wird das übergeordnete Forschungsprojekt, in das die vorliegende Arbeit eingebunden ist, vorgestellt und der Aufbau der weiteren Arbeit kurz umrissen.

1.1 Problemstellung und Forschungsziel

Der klassische Isolierstoff der Hochspannungstechnik in der elektrischen Energieübertragung und -verteilung ist Keramik. Anfang des 20. Jahrhunderts waren Porzellankappen die marktbeherrschende Technik. In den 1930er und 1940er Jahren kamen dann Porzellanlangstäbe und Glaskappen dazu. Auch Porzellanhohlisolatoren wurden bald gefertigt. Mitte der 1960er Jahre begann die Forschung an Verbundisolatoren. Es wurden verschiedene Konzeptionen mit Epoxidharz oder auch Glasfaser-verstärktem-Kunststoff (GFK) und Epoxidharz erprobt. Das sich durchsetzende Konzept im Bereich der Hochspannungstechnik war jedoch die Kombination eines tragenden GFK-Stabes und einer Silikonelastomerumhüllung, der moderne Kompositisolator [KÄR 70]. Seit den 1980er Jahren sind Hochspannungsisolatoren dieses Typs auch in größeren Mengen in Verwendung und haben sich im Einsatz bewährt. Ebenso wurde in den 1970er Jahren das Fertigungsprinzip der Komposit-Langstabisolatoren auf Hohlisolatoren übertragen [KUN 98] [AMS 84]. Auch diese sind seit jener Zeit erfolgreich im Einsatz.

Während Kappenisolatoren und Langstäbe für den Einsatz in Freileitungen genutzt werden, sind Hohlisolatoren hauptsächlich als Geräteisolatoren in Verwendung. Sie werden beispielsweise als Stützisolatoren, Isolatorgehäuse für Strom- und Spannungswandler, Spannungsteiler, Überspannungsableiter, Schaltkammerüberwürfe oder als Isolierung zwischen Ober- und Unterspannungswicklung in

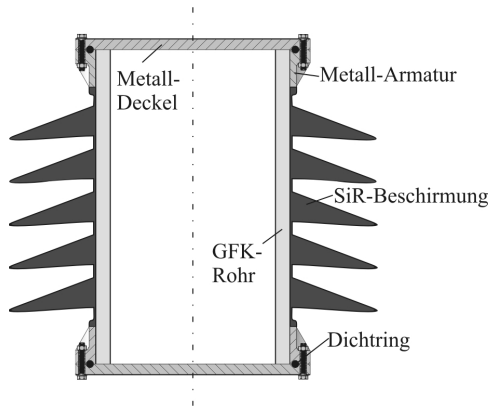


Bild 1.1: Der schematische Aufbau eines Komposithohlisolators im Querschnitt.

Transformatoren eingesetzt [SCH 93].

Ein Komposit-Hohlisolator besteht aus einem GFK-Rohr, einer Beschirmung aus Silikonelastomer (SiR aus dem englischen silicone rubber) und metallenen Armaturen, welche meist in Aluminium, oder bei höheren mechanischen Anforderungen auch in Stahl, ausgeführt werden (siehe Bild 1.1). Die Metalldeckel werden mit einem Dichtring abgedichtet.

Die Vorteile der Komposittechnologie sind vielseitig und beinhalten unter anderem Explosions-, Erdbeben- und Vandalismussicherheit, sowie das geringere Gewicht, die höhere mechanische Festigkeit und die kurzen Lieferzeiten im Vergleich mit Porzellan. Außerdem zeichnen sich mit SiR beschirmte Kompositisolatoren durch die Eigenschaft der Hydrophobie der Oberfläche auch bei Verschmutzung und eine gute Maßhaltigkeit aus.

Einer der Nachteile dieser Technologie ist jedoch, dass die Werkstoffe SiR und GFK, da sie organisch sind, prinzipiell wasserdampfdurchlässig sind. Dies könnte theoretisch zu Problemen führen, falls zu viel Feuchtigkeit in das Innere des Hohlisolators gelangen würde. Sie könnte sich an den Komponenten, die im Hohlisolator eingebracht sind, oder an der Innenwand des Isolators niederschlagen. Hierdurch würde eine Leitfähigkeit hergestellt, welche die Funktionsfähigkeit und damit die

Lebensdauer des Gerätes beeinträchtigen könnte.

Die Anwendung der Komposit-Hohlisolatoren seit über 35 Jahren hat gezeigt, dass dies im Gebrauch offenbar nicht auftritt. Da es hierüber jedoch noch keine umfassenden wissenschaftlichen Nachweise gibt, steht die bisher unbeantwortete Frage der Wasserdampfdichtigkeit der Durchsetzung dieser Technologie noch immer im Wege. Insbesondere im Hinblick auf zukünftige Designänderungen oder Kostenoptimierungen, wie z.B. eine geringere Wanddicke oder andere Fertigungsverfahren, ist es wichtig, diese mögliche Schwachstelle genauer zu untersuchen und zu spezifizieren. Aus diesem Grunde soll in dieser Arbeit die Wasserdampfdurchlässigkeit des Gesamtsystems Komposit-Hohlisolator bestimmt werden.

1.2 Einordnung der Arbeit in das Gesamtforschungsprojekt

Diese Arbeit ist Teil des AIF-Forschungsprojektes 14121 N mit dem Titel »Wasserdampfdichtigkeit und mechanische Schädigungsgrenzen von Komposit-Hohlisolatoren für Hochspannungsgeräte in der elektrischen Energieversorgung« (siehe auch [MOE 05 I] und [MOE 05 II]). Das Projekt wird von der Staatlichen Materialprüfungsanstalt (MPA) Darmstadt und dem Fachgebiet Hochspannungstechnik (FG HST) der Technischen Universität Darmstadt gemeinschaftlich durchgeführt. Dabei sind die Untersuchungen der mechanischen Schädigungsgrenzen an der MPA und die der Wasserdampfdichtigkeit am FG HST angesiedelt.

Das Projekt hat zum Ziel, zwei bisher noch nicht abschließend behandelte Fragestellungen bezüglich Komposit-Hohlisolatoren zu klären. Dies sind einerseits die schon im Kapitel 1.1 dargelegte Wasserdampfdichtigkeit und andererseits die mechanischen Schädigungsgrenzen. Auch die Wechselwirkung dieser beiden Punkte soll untersucht werden. So kann die mechanische Belastung eines Komposit-Hohlisolators zu Schädigungen an oder in diesem führen, was zu einer erhöhten Durchlässigkeit gegenüber Feuchtigkeit führen könnte.

Das Versuchsprogramm umfasst dabei zwei verschiedene Abläufe, die im Folgenden kurz dargestellt werden:

Im ersten Fall werden neuwertige Komposit-Hohlisolatoren auf ihr Verhalten hinsichtlich Wasserdampfdichtigkeit hin untersucht und dann mechanisch belastet

(Kapitel 6.3).

Im zweiten, parallel stattfindenden Ablauf werden neuwertige Rohre mit verschiedenen Belastungsprofilen mechanisch belastet und danach auf ihre Wasserdampfdichtigkeit hin untersucht. Dies liefert Erkenntnisse über die Auswirkungen der verschiedenen Profile bezüglich ihres Einflusses auf die Wasserdampfdichtigkeit (Kapitel 6.4).

Weitere rein mechanische Versuche betrachten die verschiedenen möglichen mechanischen Belastungsprofile und Belastungsarten (Kapitel 4.5).

Es werden drei verschiedene Bauarten von Komposit-Hohlisolatoren untersucht, wobei sich zwei Varianten durch ihre Wandstärke unterscheiden. Dies ist insbesondere im Hinblick auf Kosteneinsparpotentiale von Interesse, da weniger Material auch geringere Kosten bedeutet. Die dritte Variante weist gegenüber den anderen Varianten die bei einem Komposit-Hohlisolator übliche Beschirmung aus SiR auf (siehe auch Bild 1.1). Da diese Beschirmung wesentlich wasserdampfdurchlässiger ist als das darunterliegende GFK-Rohr (siehe auch Kapitel 2.3), wird sie bei den beiden anderen Varianten aus handhabungs- und fertigungstechnischen Gründen weggelassen. Weil es jedoch möglich ist, dass die Wasseraufnahme an der GFK-Oberfläche durch die Beschirmung beeinflusst wird, soll ein Vergleich zwischen den Ausführungen mit und ohne SiR-Beschirmung, auch im Hinblick auf mögliche Folgeversuche, vorgenommen werden. Wie im Kapitel 6.2 noch dargelegt und begründet wird, wird auf die SiR-beschirmte Variante zugunsten einer höheren Prüflingsanzahl der anderen Varianten im späteren Verlauf der Untersuchungen verzichtet.

Die vorliegende Arbeit stellt die Entwicklung der Versuchstechnik und die Untersuchung der Wasserdampfdurchlässigkeit neuwertiger Prüfkörper vor. Auch die Wasserdampfdichtigkeit mechanisch vorgeschädigter Komposit-Hohlisolatoren wird für verschiedene mechanische Belastungsprofile dargestellt. Auf der Grundlage der gewonnenen Ergebnisse wird das Versuchsverfahren weiter optimiert und in seiner veränderten und verkürzten Form auf weitere Komposit-Hohlisolatoren angewendet. Die weiteren rein mechanischen Versuche sind derzeit noch in Arbeit oder werden von der MPA Darmstadt betreut und veröffentlicht.

1.3 Struktur der Arbeit

In den ersten beiden Kapiteln wird auf die relevanten theoretischen Grundlagen eingegangen. Dabei beschäftigt sich Kapitel 2 mit den untersuchten Materialien, während Kapitel 3 auf die Wasserdampfdurchlässigkeit, die zugrundeliegenden Mechanismen und mathematischen Zusammenhänge eingeht. Im Kapitel 4 wird die entwickelte und verwendete Versuchstechnik beschrieben, bevor in Kapitel 5 und 6 die gewonnenen Messergebnisse an Materialproben bzw. Prüfkörpern dargestellt werden. Es folgen die Auswertung der Ergebnisse in Kapitel 7 und eine Zusammenfassung.

2 Komponenten und Materialien in Verbundisolatoren

In diesem Kapitel sollen die eingesetzten und untersuchten Werkstoffe und Komponenten dargestellt werden. Es werden die verschiedenen Materialien und ihre Herstellungsprozesse, sowie ihre Rolle im Gesamtsystem Komposit-Hohlisolator erklärt und ihr Aufbau, sofern er zum Verständnis dieser Arbeit notwendig ist, dargestellt.

2.1 Komposit-Hohlisolatoren

Der klassische Werkstoff für die Freiluftisolation von Hochspannungsbetriebsmitteln in der elektrischen Energieversorgung ist Porzellan. Für dieses liegen jahrzehntelange Betriebserfahrungen vor. Aber es bringt auch bekannte Nachteile mit sich, wie Bruch- und Explosionsgefahr, ungünstiges Verhalten unter Verschmutzungsbedingungen, hohes Gewicht oder lange Lieferzeiten. Daher wurde das Prinzip der Kompositisolatoren [KÄR 70] im Jahre 1980 auch auf Hohlisolatoren übertragen (siehe auch Kapitel 1). Hierbei werden die Vorteile zweier Materialien, von SiR (siehe auch Kapitel 2.3) und GFK (siehe auch Kapitel 2.2), miteinander verbunden.

Ein Komposit-Hohlisolator (Bild 1.1) besteht aus einem GFK-Rohr, welches die mechanischen Kräfte im Isolator aufnimmt und einer Beschirmung aus SiR, das sehr gute Isolationseigenschaften besitzt und eine gute Hydrophobie aufweist. An den Enden sind metallische Armaturen aufgebracht. Die bestimmenden Materialien sind somit das GFK bzw. seine Komponenten und das schirmende SiR.

2.2 Glasfaserverstärkter Kunststoff

Die glasfaserverstärkten Kunststoffe sind eine Untergruppe der faserverstärkten Kunststoffe, die grundsätzlich aus einem Kunststoff, der sogenannten Matrix, und einer verstärkenden Faser bestehen. Als Verstärkungsfasern kommen dabei sowohl organische (z. B. Aramid-, Kohlenstoff- oder Polyester-) Fasern als auch anorganische (z. B. Keramik-, Bor- oder Basalt-) Fasern und sogar Naturfasern (z. B. aus Holz, Flachs oder Sisal) zum Einsatz. Werden als Verstärkungsfasern die anorganischen Glasfasern gewählt, so spricht man von glasfaserverstärktem Kunststoff.

Der Anteil der Glasfasern am Gesamtwerkstoff wird in Gewichts- oder Volumenprozenten als Glasgehalt angegeben. Die in dieser Arbeit betrachteten GFK weisen als Stäbe einen Glasfasergehalt von 65 Gew.-% bis 67 Gew.-% und als Rohre einem Glasfasergehalt von 70 Gew.-% bis 75 Gew.-% auf. Die Anordnung der Fasern in der Matrix kann je nach Anwendungsfall verschieden sein und wird für die verwendeten Materialien in Kapitel 2.2.3 genauer beschrieben.

Als Matrixsysteme kommen Thermoplaste und Duroplaste, die sogenannten Gießharze, zum Einsatz [EHR 92]. In der Hochspannungstechnik und insbesondere bei der Fertigung von Komposit-Isolatoren werden jedoch fast ausschließlich Epoxidharze (EP) (siehe Kapitel 2.2.2) verwendet. Sie haben sich auf Grund ihrer guten elektrischen Eigenschaften, wie z. B. hohe Durchschlagsfestigkeit, hohe mechanische Belastbarkeit, geringe Schrumpfung beim Aushärten, die eine sehr genaue Fertigung ermöglicht, und ihrer guten Klebeeigenschaften bewährt.

2.2.1 Glasfasern

Glasfasern sind dünne, aus Glas bestehende Fäden. Eine Glasfaser weist im Vergleich zu einem Glasblock, einem sogenannten Monolithen, eine höhere Festigkeit auf. Mit abnehmendem Faserquerschnitt nimmt die Faserzugfestigkeit sogar noch zu. Dies beruht darauf, dass sich die mechanischen Fehlstellen pro Längeneinheit mit abnehmendem Volumen, also dem kleiner werdenden Glasquerschnitt, verringern, woraus eine Erhöhung der Festigkeit resultiert [FLE 95].

Glasfasern teilen sich in die Gruppe der nicht verspinnbaren Isolierfasern, wie sie

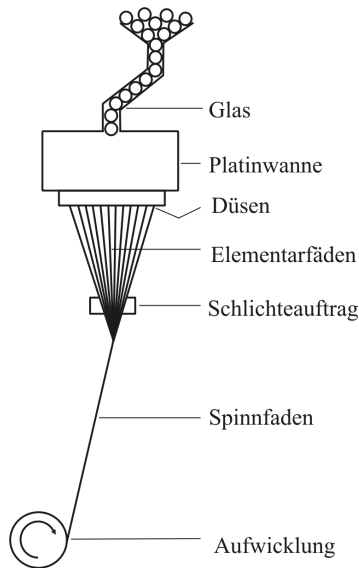


Bild 2.1: Das Düsenziehverfahren zur Herstellung von Endlostextilglasfasern [ZOR 03].

z. B. für Glaswolle genutzt werden, und der verspinnbaren Textilfasern. Zu den verspinnbaren Textilfasern gehören sowohl die Glasstapelfasern, eine Spinnfaser, als auch das Glasfilament, die Endlosfaser. Für die Herstellung von in der Industrie gebräuchlichen GFK-Rohren für Komposit-Hohlisolatoren kommen ausschließlich endlose Textilglasfasern, das Glasfilament, in Frage [SCH 93]. Im Weiteren wird deshalb vereinfachend das Wort Glasfaser ausschließlich für diese Unterart genutzt.

Die verwendeten Glasfasern werden überwiegend mit Hilfe des Düsenziehverfahrens (Bild 2.1) gewonnen. Hierbei wird eine Glasschmelze einer Wanne mit Bodenlöchern zugeführt. Durch diese Düsen mit einem Durchmesser von 1 bis 2 mm tritt das flüssige Glas aus und wird mit hoher Geschwindigkeit durch die Aufwicklung abgezogen. Dabei verringert sich der Durchmesser des Fadens je nach Geschwindigkeit der Anlage auf 3 bis 18 μm , und die Faser kühlt ab. Es wird eine Schlichte aufgetragen, und die Filamente werden zu Spinnfäden und diese

wiederum zu Rovings zusammengefasst und auf einem Spulenkopf aufgewickelt [EHR 81] [FLE 95].

Auf die frisch gezogene Faser wird eine Schlichte aufgebracht, um die Filamente zu einem Spinnfaden zu verkleben und die empfindliche spröde Oberfläche zu schützen. Es gibt Textilschichten, die das spätere Verweben der Glasfasern ermöglichen, aber vor dem Verstärken mit Kunststoff wieder entfernt werden müssen, und Kunststoffschichten, wie sie für die Fertigung der hier betrachteten Glasfasern verwendet werden. Eine solche Kunststoffschicht kann auf den Glasfasern verbleiben und enthält Haftvermittler, welche die Haftung zwischen der anorganischen Glasfaser und dem organischen Harz verbessern.

Für die Herstellung von Glasfasern können verschiedene Glasarten verwendet werden. Während normales Quarzglas lediglich aus einer Quarzschmelze entsteht, der Soda und/oder Pottasche als Flussmittel zur Einleitung und Förderung der Schmelze zugesetzt wurde, können durch die Zugabe unterschiedlicher Metalloxide Gläser mit verschiedenen Eigenschaften entstehen [FLE 95]. Die verbreitetsten Glasarten sind:

E-Glas: Glas für den elektrischen Einsatz

R-Glas: Glas mit hoher Zugfestigkeit

M-Glas: Glas mit hohem Elastizitäts-Modul

C-Glas: Glas mit guten chemischen Eigenschaften, insbesondere säurebeständig

D-Glas: Glas mit niedriger Dielektrizitätszahl

ECR-Glas: Korrosionsbeständiges E-Glas

Für die Herstellung der Komposit-Hohlisolatoren kommt dabei hauptsächlich ECR-Glas, in einigen Fällen auch E-Glas zum Einsatz. ECR-Glas enthält weniger Bor-, Aluminium- und Calcium-Ionen als herkömmliches E-Glas und ist besonders säureresistent, was insbesondere dem bei Komposit-Langstabisolatoren gefährlichen Sprödbruch entgegenwirkt. Zur näheren Erläuterung des Sprödbruchs siehe auch [SPA 84], [CHA 83] und [KUM 05 II].

Die untersuchten GFK wurden unter der Verwendung von ECR-Glas hergestellt.

2.2.2 Epoxidharz

Epoxidharze gehören zur Gruppe der duroplastischen Polymere. Grundsätzlich zeichnen sich Duroplaste dadurch aus, dass die mehrdimensionale Vernetzung zwischen den Molekülketten, die für Polymere (aus dem griechischen poly=viele und meros=Teil) typisch ist, sich bei der Erwärmung des Materials nicht mehr auflösen lässt [KUE 05]. Im Gegensatz zu Thermoplasten, der zweiten Gruppe der Polymere, ist ein Schmelzen des Materials nach der Vernetzung nicht mehr möglich. Aus diesem Grund muss auch die Härtung in der für den Endwerkstoff vorgesehenen Form erfolgen, eine nachträgliche Änderung ist nur noch über ein mechanisches Abtragen möglich.

Epoxidharze sind chemisch gekennzeichnet durch die Epoxidgruppe (Bild 2.2), die die starke Reaktionsfreudigkeit dieses Harzes begründet [MOE 90]. Dem Harz wird ein Härter zugegeben, der im Molekül aktive Wasserstoffatome enthält, welche mit der Epoxidgruppe des Harzes reagieren [EHR 92]. Bei dieser Reaktion, der Polyaddition, dient der Härter nicht als Katalysator der Härtung, sondern als Reaktionspartner des Harzes. Diese noch flüssige Masse heißt Reaktionsharzmasse. Ihr können noch weitere verschiedene Stoffe zugesetzt werden, um z. B. bestimmte Eigenschaften zu verbessern oder Kosten einzusparen, so dass die Reaktionsmasse aus folgenden Komponenten besteht:

- Harz
- Härter
- Beschleuniger, fakultativ
- Füllstoff, fakultativ

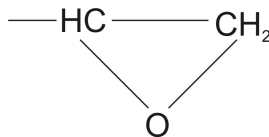


Bild 2.2: Die Epoxidgruppe.

- Additive, fakultativ
- Haftvermittler, fakultativ

Harz und Härter können dabei entweder aromatisch oder cycloaliphatisch sein, wobei meist nur gleichartige Systeme kombiniert werden. Rein aromatische Systeme weisen bessere Werte hinsichtlich mechanischer, elektrischer und dielektrischer Eigenschaften auf, cycloaliphatische Systeme sind hingegen in der Regel UV-beständiger und widerstandsfähiger gegen das Ausbilden leitfähiger Kriechspuren [SEI 98].

Die Härtungsreaktion selbst ist vom Härter abhängig. Am verbreitetsten ist die Härtung durch Polycarbonsäureanhydride oder organische Polyamide. Der genauere chemische Ablauf der Härtung oder weitere Härtungsarten können der Literatur, z. B. [AVK 04] [FLE 95], entnommen werden. Die Härtung ist eine exotherme Reaktion und führt zu einem Epoxidharzformstoff. Meist wird der ausgehärtete Formstoff der Einfachheit halber ebenso wie die ursprüngliche Harzkomponente als Epoxidharz (EP) bezeichnet. Dies soll auch im weiteren Verlauf der Arbeit so genutzt werden.

Bei Epoxidharzen muss das stöchiometrische Mischungsverhältnis zwischen Harz und Härter sehr genau eingehalten werden, da sonst Teile des Harzes oder des Härters ohne Reaktionspartner in der Reaktionsmasse verbleiben [EHR 92]. Überschüssige Harzanteile können zu einer klebrigen Oberfläche des Formstoffes, selbst nach dem Aushärten, führen, überzähliger Härter kann den Formstoff brüchig werden lassen.

Die untersuchten GFK-Materialien basieren, sofern nicht anders dargestellt, auf einem Bisphenol-A-Epoxidharz, welches mit Carbonsäureanhydrid als Härter heiß gehärtet wurde, es ist ein aromatisches System. Der Name Bisphenol-A leitet sich aus den Bestandteilen des Harzes, 2 Mol Phenol und 1 Mol Aceton, ab.

2.2.2.1 Glasübergang

Der Glasübergang ist laut [DIN 51 005] ein reversibler Übergang von amorphen Substanzen oder den amorphen Bereichen teilkristalliner Substanzen von einem

harten, spröden (eingefrorenen) Zustand in die Schmelze oder einen gummiartigen Zustand. Der entsprechende Temperaturpunkt wird als Glasübergangs- bzw. Glasumwandlungstemperatur T_g bezeichnet. Beim Glasübergang ändern sich viele Materialeigenschaften (z.B. E-Modul, spezifische Wärmekapazität, Ausdehnungskoeffizient) deutlich stärker (sprunghaft) als in den angrenzenden Temperaturbereichen.

Epoxidharze sind amorphe (nicht kristalline) Materialien, die beim Glasübergang vom Glaszustand in einen gummiartigen Zustand wechseln.

Ein Glas hat alle Eigenschaften einer Flüssigkeit, bis auf die der Verformbarkeit, so dass bei der Beschreibung des Glasübergangspunktes vereinfacht von einer Flüssigkeit ausgegangen werden kann. In einer Flüssigkeit gibt es, zusätzlich zu den molekularen Elementarbewegungen, welche auch im Festkörper stattfinden, kooperative Bewegungen. An diesen kooperativen Bewegungen nehmen mehrere Moleküle oder Molekülsegmente teil. Diese werden auch als kooperative Einheiten bezeichnet, welche räumlich und zeitlich schnell wechselnde Molekülgruppen aus gleichartigen Molekülen sind. Unterhalb des Glasübergangs sind diese kooperativen Bewegungen nicht möglich. Erst oberhalb davon ist diese Form der thermischen Beweglichkeit vorhanden. Die Zeitdauer der kooperativen Umlagerung bis zum Gleichgewicht der Probe bei Erwärmung bzw. Abkühlung wird als Relaxationszeit τ bezeichnet. Diese verringert sich mit steigender Temperatur. Kühlt man das Material ab, verlängert sich die Relaxationszeit, was bedeutet, dass die kooperativen Bewegungen langsamer werden. Unterteilt man nun zur Verdeutlichung gedanklich die kontinuierliche Abkühlung in kleine Schritte (Bild 2.3), so erkennt man, dass bei hohen Temperaturen (Markierung 1) die Relaxationszeit so klein ist, dass während des gedachten Schrittes die Probe vollständig ins Gleichgewicht kommen kann. Bei geringeren Temperaturen (Markierung 2) wird die Relaxationszeit merklich größer. Die Bewegungen sind aber immer noch schnell genug, um während eines Schrittes noch ein Gleichgewicht zu bewirken. Bei noch geringeren Temperaturen (Markierung 3) jedoch sind die kooperativen Bewegungen so langsam geworden, dass die gegebene Zeit zum Ausgleich nicht mehr ausreicht. Die entsprechenden Bewegungen »frieren ein«. Es bleiben nur noch die festkörper-

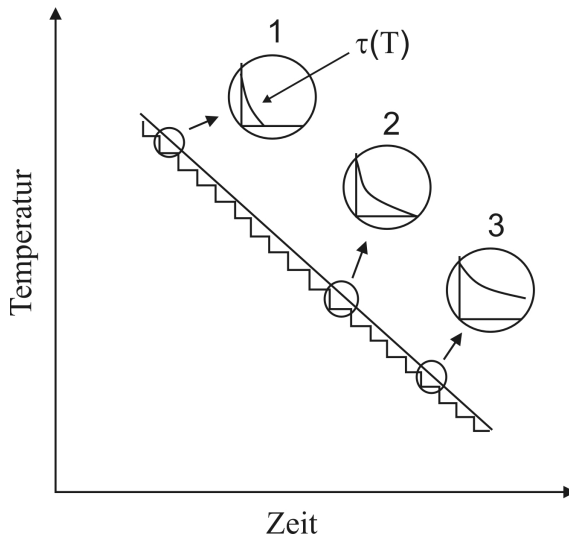


Bild 2.3: Darstellung der thermischen Relaxation bei einer stufenförmigen Abkühlung im Bereich des Glasübergangs [USE 99].

spezifischen Bewegungen übrig, so dass sich das Glas wie ein Festkörper verhält, obwohl seine Struktur der einer Flüssigkeit entspricht.

Epoxidharze sind amorph und unterliegen ebenfalls diesem Phänomen. Unterhalb der Glasübergangstemperatur ist die Kettenbeweglichkeit des EP eingefroren. Mit steigender Temperatur können sich ab dem Glasübergang immer mehr Ketten ungehindert bewegen. In diesem gummielastischen Zustand bewegen sich die Ketten relativ schnell. Wird jedoch die Temperatur erniedrigt, so werden diese Bewegungen langsamer, bis schließlich die verfügbare thermische Energie nicht mehr ausreicht, um die Rotationsenergieschwellen in den Ketten zu überwinden. Dies ist der Glasübergangspunkt, an dem die Ketten in der Konformation »eingefroren« werden, die sie beim Erreichen dieses Temperaturpunktes innehatten. Diese Änderung ist eine Funktion der Molekularbewegung und nicht der Polymerstruktur. Unterhalb des Glasübergangs befindet sich das EP dann im Glaszustand. Es ist eine gefrorene Flüssigkeit mit einer völlig statischen Struktur.

Die Glasumwandlungstemperatur lässt z. B. Rückschlüsse auf den Vernetzungsgrad des EP zu, vom dem sie stark abhängig ist. So bedeutet ein höherer Vernetzungsgrad eine höhere T_g und umgekehrt. Des Weiteren verändert sich an diesem Punkt das Diffusionsverhalten, da auf Grund der geringeren Beweglichkeit der Polymerketten unterhalb der Glasübergangstemperatur eine Zeitverzögerung in der Reaktion des Polymers auf das Permeat auftritt (siehe Kapitel 3.5) [CRA 95].

Der Einsatz von EP in Komposit-Hohlisolatoren erfolgt unterhalb der Glasübergangstemperatur.

2.2.3 GFK als Isolatorenmaterial

Die Verarbeitung von Glasfasern und Epoxidharz zu GFK erfolgt prinzipiell durch das Ansetzen der Reaktionsharzmasse, das Tränken der Fasern, die Formgebung und die Härtung. Dabei kommen verschiedene Methoden zum Einsatz: Es gibt handwerkliche Verfahren, wie das Handlaminierverfahren, diskontinuierliche maschinelle Verfahren, wie das Schleuder- oder das Pressverfahren, und kontinuierliche maschinelle Verfahren, wie das Strangziehverfahren. In einigen Fällen wird eine Nachbearbeitung des ausgehärteten Bauteils angeschlossen [EHR 92].

2.2.3.1 GFK-Stäbe für Komposit-Longstabisolatoren

GFK-Stäbe für Komposit-Longstabisolatoren werden hauptsächlich im kontinuierlichen Strangziehverfahren, der sogenannten Pultrusion, hergestellt (Bild 2.4). Von mehreren Spulen werden Rovings abgezogen und gebündelt, sie werden mit Harz

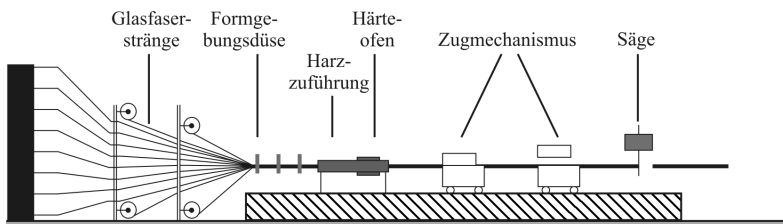


Bild 2.4: Das Strangziehverfahren zur Herstellung von GFK-Stäben.

getränkt und in einem meist beheizten Werkzeug in die gewünschte Form geführt, verdichtet und ausgehärtet. Kontinuierlich wird dabei weiteres Material nachgezogen und am Ende des Prozesses in der benötigten Länge abgesägt und aus dem Prozess entfernt. Die Verstärkung erfolgt hierbei unidirektional in axialer Richtung des Stabes. Das Strangziehverfahren kann sowohl horizontal als auch vertikal ausgeführt werden, wobei die vertikale Ausführung eine gleichmäßigere Harz-Glas-Verteilung ermöglicht, da die Schwerkraft parallel zur Faser wirkt.

2.2.3.2 GFK-Rohre für Komposit-Hohlisolatoren

GFK-Rohre für den Einsatz in Komposit-Hohlisolatoren müssen hohen mechanischen Anforderungen genügen. Aus diesem Grund sind ausschließlich aus Endlosfasern gewickelte Rohre im Einsatz. Rohre, die z.B. im Schleuderverfahren auch aus Stapelfasern preisgünstig und schnell erstellt werden können, stellen nicht die benötigten mechanischen Festigkeiten zur Verfügung.

Damit die Isolatoren den verschiedenen mechanischen Belastungen, die bei verschiedenen Einsatzgebieten auftreten, standhalten, können Rohre mit verschiedenen Wickelwinkeln (Bild 2.5) genutzt werden. Dabei ist eine Variation des Winkels α zwischen 0° und 90° möglich. Die rein axiale Verstärkung, also ein Wickelwinkel von $\alpha = 0^\circ$, wird für eine hohe Festigkeit bei einer absehbaren Beanspruchung in Axialrichtung genutzt. Eine fast rein radiale Verstärkung von $\alpha \approx 90^\circ$ hingegen führt zu einer Erhöhung der Berstfestigkeit. Meist treten jedoch beide Belastungs-

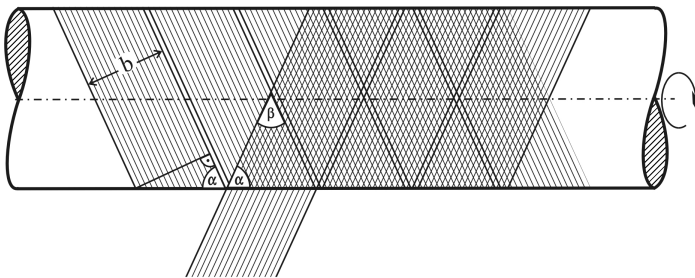


Bild 2.5: Die Definition der Wickelwinkel [SCH 75].

formen gleichzeitig auf. Außerdem ist bei der rein axialen Verstärkung die geringere Durchschlagsfestigkeit des GFK entlang der Faserrichtung zu beachten, da auch die Spannungsbelastung meist in axialer Richtung des Isolators erfolgt. Insofern werden, außer für Sonderanwendungen, meist Wickelwinkel um die $\alpha = 45^\circ$ verwendet. Der genaue Winkel wird dabei meist mit modernen Berechnungsprogrammen dem erwarteten mechanischen Belastungsprofil angepasst. Somit ergeben sich im Allgemeinen drei Wickeltypen, von denen der dritte am gebräuchlichsten ist:

Parallelgewickelt: Die Fasern werden in Radialrichtung mit einem Wickelwinkel von bis zu maximal 90° aufgelegt. Parallelgewickelte Rohre erreichen eine hohe Bruchfestigkeit.

Axialgewickelt: Die Fasern werden parallel in Axialrichtung aufgelegt. Der Wickelwinkel liegt bei nahezu 0° . Axialgewickelte Rohre haben eine besonders hohe Biege-, Längsdruck- und Zugfestigkeit.

Kreuzgewickelt: Die Fasern werden in zwei Richtungen gewickelt, so dass sie sich in einer Wickellage kreuzen. Der Wickelwinkel liegt meist über 45° . Kreuzgewickelte Rohre zeichnen sich durch eine gute Torsionsfestigkeit aus.

Das Filament-Winding-Verfahren Mit dem Filament-Winding- oder auch Wickelverfahren (Bild 2.6) können rotationssymmetrische GFK-Körper hergestellt werden. Neben den üblichen Rohren ist aber auch die Fertigung konischer oder bauchi-

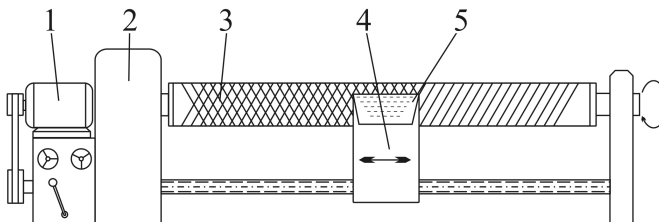


Bild 2.6: Das Wickelverfahren zur Herstellung von GFK-Rohren [SCH 75].

1: Antrieb; 2: Getriebe; 3: Wickeldorn; 4: Support; 5: Tränkwanne mit Harz

ger Körper, je nach Form des Wickeldorns, möglich. Während sich der Wickeldorn kontinuierlich dreht, werden die Rovings in einem Harzbad imprägniert und über eine Führungshilfe auf den Dorn gewickelt. Durch die Bewegung der Führungshilfe können dabei verschiedene Wickelwinkel realisiert werden. Das Rohr wird also mit getränkten, nassen Fäden gewickelt. Deshalb wird dieses Verfahren zur besseren Unterscheidung auch als Nasswickelverfahren bezeichnet. Erst im Anschluss wird das Rohr gehärtet. Durch das Aufwickeln der harzgetränkten Fasern kann es zu Lufteinschlüssen im Material kommen, was nach Möglichkeit zu minimieren ist. Lufteinschlüsse stellen eine Fehlstelle im Material dar, die je nach Belastung auch zum elektrischen Versagen des Isolators führen kann.

Der Vakuumverguss Beim Vakuumverguss wird das Rohr trocken gewickelt und in einer Negativ-Form abgelegt. Die Enden der Form werden verschlossen und an einer Seite eine Absaugung zur Etablierung des Vakuums in Betrieb genommen. Von der anderen Seite her wird die Harzzufuhr sicher gestellt. Durch das Vakuum wird das Harz in den trockenen Wickelkörper hineingezogen. Die Wickellagen werden gleichmäßig durchtränkt, und es entstehen nahezu keine Lufteinschlüsse. Außerdem sind mit diesem Verfahren höhere Glasgehalte zu erreichen als mit dem Nasswickelverfahren. Dieses Verfahren wird auch als Vakuumimprägnierung bezeichnet. Nach diesem Verfahren hergestellte Rohre sind grundsätzlich teurer als nach dem Nasswickelverfahren produzierte.

2.3 Silikonelastomer

Der umgangssprachliche Name Silikon (Silikonelastomer bzw. engl. *silicone rubber* (SiR)) hat sich für Polymere eingebürgert, deren Grundstruktur aus SiR_2O -Elementen besteht. Sie heißen Polysiloxane und sind über Sauerstoff-Atome O verknüpfte Silizium-Atome Si (Siloxankette), deren nicht durch Sauerstoff gebundene Valenzen durch organische Reste R gesättigt sind (Bild 2.7). Der gebräuchlichste Rest ist die Methylgruppe $\text{R} = \text{CH}_3-$. Sie gehören zur Gruppe der Elastomere, einer Untergruppe der Polymere, die eine eher lose räumliche Vernetzung aufweisen

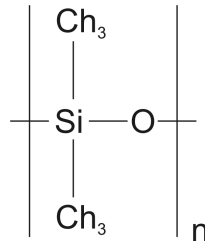


Bild 2.7: Die Siloxaneinheit mit dem gebräuchlichsten Rest, der Methylgruppe.

und ein elastisches Verformen schon bei Umgebungstemperatur aufweisen. Aus dem Grundaufbau der Silikone ergeben sich vier Strukturelemente:

- Die M-Struktur ist monofunktionell und bildet den Abschluss einer Silizium-Sauerstoff-Kette.
- Die D-Struktur ist difunktionell und stellt den Grundbaustein für Ketten und und cyclische Gebilde dar.
- Die T-Struktur ist trifunktionell und bildet die Vernetzungsknoten bei dreidimensional vernetzten Strukturen.
- Die Q-Struktur ist tetrafunktionell und gewöhnlich nur in Harzen vorhanden, da sie zu stark vernetzten Gebilden führt.

Die meisten für Kompositthohlisolatoren verwendeten SiR bestehen aus M-, D- und T-Strukturen. Die Ketten sind über die T-Strukturen weitmaschig vernetzt, und die organischen Reste sind vorwiegend Methylgruppen. Es wird deswegen auch von Polydimethylsiloxanen (PDMS) gesprochen. Diese Methylgruppen können sich um die Hauptkette frei drehen und somit einen energetisch günstigen Zustand einnehmen. Die Gesamtkette bildet deshalb eine Wendel- bzw. Helixstruktur aus. Aus den vorgestellten Basispolymeren können verschiedene Silikonkautschuke formuliert werden. Silikonkautschuk bezeichnet dabei das noch nicht vernetzte Silikonssystem, Silikonelastomer das ausvulkanisierte System. Die folgenden Komponenten beschreiben die Zusammensetzung des Kautschuks:

- Basispolymer
- Füllstoffe
- Vernetzer, Katalysator
- Spezielle weitere Zusätze

Die verschiedenen Kautschuksysteme, wie auch die Elastomere, werden dabei wie folgt unterschieden:

- RTV-1 = Raumtemperaturvernetzender Einkomponenten-Kautschuk
- RTV-2 = Raumtemperaturvernetzender Zweikomponenten-Kautschuk
- HTV = Hochtemperaturvernetzender Festkautschuk
- LSR oder auch LR = Liquid Silicone Rubber (Hochtemperaturvernetzender Flüssigsilikonkautschuk)

Hierbei werden lediglich das RTV-2-, HTV- und LSR-System für die Fertigung von Komposithohlisolatoren eingesetzt, wobei die aktuelle Entwicklung sich fast ausschließlich auf die Systeme HTV und LSR beschränkt.

SiR ist auf Grund seiner niedrigen Oberflächenenergie hydrophob. Dies bedeutet das Wasser auf der Silikonoberfläche abperlt (zur Definition der Hydrophobie siehe auch [KIN 05], [STRI] und [IEC/TS 62073]). Trotzdem ist SiR als Material an sich wesentlich wasserdampfdurchlässiger als Epoxidharz, der Kunststoff des GFK [AMS 84] [KUE 05].

2.4 O-Ringe

Zur Dichtung der Armaturen der Komposithohlisolatoren gegen die Deckel werden im Allgemeinen O-Ringe verwendet. Dies sind endlos hergestellte Runddichtungen aus elastischen Materialien mit einem kreisförmigen Querschnitt, deren Innendurchmesser mit d_1 und deren Schnurstärke mit d_2 bezeichnet wird [SCH 87]. Die Dichtwirkung von O-Ringen beruht dabei auf der Verpressung des Querschnitts,

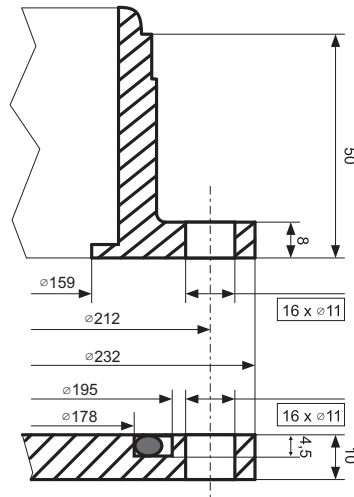


Bild 2.8: Dichtsystem des Deckels mit O-Ring; Armatur vereinfacht dargestellt.

welche durch die Schnurstärke des O-Rings und die Abmessungen des Einbauraums bestimmt wird. Grundsätzlich werden beim Einsatz von O-Ringen die statische, die dynamische und die quasistatische Abdichtung unterschieden. Zur Berechnung der Abmessungen der meist rechteckförmigen Nut stellen die Hersteller von O-Ringen in der Regel Programme zur Verfügung, die sich an den neuesten Erfahrungen orientieren. Auch die Literatur stellt Berechnungshilfen bereit (z. B. [SCH 87]).

Die verwendete Abdichtung des Deckels ist statisch und die Verformung des O-Rings in der Anwendung als Deckeldichtung ist axial. Die verwendeten O-Ringe weisen folgende Abmessungen auf, $d_1 = 175 \text{ mm}$ und $d_2 = 6 \text{ mm}$, und sind aus Acrylnitril-Butadien-Kautschuk 72 NBR 872. Auf Grund der Tatsache, dass eine geringe Ölbelastung der Umgebung durch eventuelle Undichtigkeiten im Heizsystem der verwendeten Versuchskammern (Kapitel 4.4) nicht auszuschließen ist, wurde auf diesen Werkstoff mit Ölbeständigkeit zurückgegriffen. Bild 2.8 zeigt das Dichtsystem des Deckels gegen den Flansch der untersuchten Komposit-Hohlisolatoren.

3 Theoretische Grundlagen zur Wasserdampfdurchlässigkeit

Die Wasserdampfdurchlässigkeit eines Komposit-Hohlisolators als Gesamtsystem setzt sich aus verschiedenen Anteilen zusammen. Die Permeation durch eine Wand lässt sich, sofern bestimmte Kennzahlen des Wandmaterials bekannt sind, berechnen. In diesem Kapitel wird auf die verschiedenen Anteile an der Wasserdampfdurchlässigkeit des Gesamtsystems eingegangen, und die zugehörigen physikalischen Grundlagen und Berechnungen werden aufgezeigt.

3.1 Wasserdampfdurchlässigkeit des Gesamtsystems

Wie schon in Kapitel 1 gezeigt, besteht ein Komposit-Hohlisolator aus verschiedenen Komponenten. Dementsprechend gibt es verschiedene Wege, über die Feuchtigkeit in das Innere des Komposit-Hohlisolators gelangen kann (siehe Bild 3.1).

- Deckel – Armatur
- Armatur – Rohr
- GFK-Rohr
- Messkabeldurchführung (nur bei diesen Untersuchungen)

Die Dichtstrecke Deckel – Armatur ist mit einem Dichtring versehen und tritt bei einem herkömmlichen Porzellan-Hohlisolator ebenso auf. Insofern ist diese Strecke aus der bisherigen Anwendung schon bekannt, und es besteht eine Sicherheit der Anwender dahingehend, die über diesen Weg eindringende Feuchtigkeit kontrollieren zu können.

Die Verbindung von Armatur und Rohr wird je nach Hersteller unterschiedlich

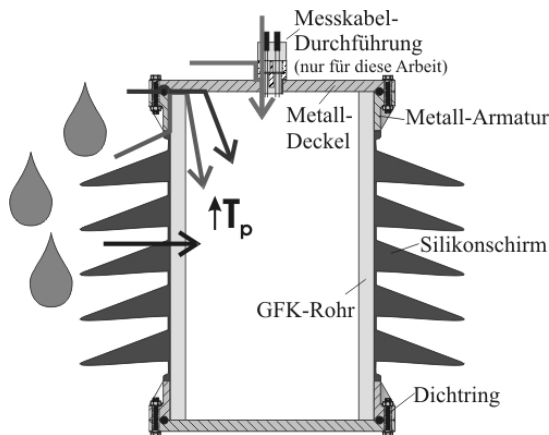


Bild 3.1: Die möglichen Eindringstrecken für Feuchtigkeit in einen Komposit-Hohlisolator.

ausgeführt. Weit verbreitet sind jedoch verschiedene Varianten einer Kombination aus einer Epoxidharzklebung und dem Aufschrupfen der Armaturen. Durch vorheriges Erwärmen dehnen sich die Armaturen etwas aus, so dass sie über das GFK-Rohr geschoben werden können. Kühlen sie wieder ab, so ziehen sie sich zusammen und verstärken durch diesen Materialdruck die Klebeverbindung von Epoxidharz und GFK. Abwandlungen dieser Methode sind sehr verbreitet und werden in der Industrie als weitestgehend dicht angesehen, wenngleich dies auf Grund der hier durchgeführten Untersuchungen als nicht sicher erscheint. Auch die untersuchten Komposit-Hohlisolatoren sind auf diese Weise abgedichtet.

Das GFK-Rohr selbst ist wie im Kapitel 2.2 dargestellt ein Verbund aus Glasfasern und Epoxidharz, bei dem das Epoxidharz, als organisches Material, wasserdampfdurchlässig ist. Der hier stattfindende Vorgang ist die Permeation. Insbesondere dieser Weg ist es, dem die Aufmerksamkeit der Anwender der Komposit-Technologie gilt, denn er unterscheidet sich grundlegend von der anorganischen Hülle eines Porzellan-Isolators.

Die Deckel der untersuchten Hohlisolatoren für die vorzunehmenden Messungen sind mit einer Durchführung versehen (siehe Kapitel 4.4.2.1). Daher existiert an

ihnen ein weiterer Weg, über den Feuchtigkeit eindringen kann, der im Normalfall nicht vorhanden ist. Der Einfluss der Durchführung setzt sich aus dem Anteil der Dichtfläche eines Aluminiumdichtrings zwischen Durchführung und Deckel mit dem folgenden Feingewinde sowie dem Anteil durch das Vergussmaterial der Durchführung zusammen und wird gesondert untersucht (siehe Kapitel 5.4).

3.2 Permeation

Bei der Permeation (von lateinisch permeare - durchdringen) durchdringt ein Stoff einen Festkörper. Die Ursache dafür ist das Konzentrationsgefälle zwischen den beiden Medien, die durch den Festkörper getrennt werden. Dabei verläuft die Permeation, wenn keine weiteren äußeren Einflüsse, wie Temperatur- oder Druckunterschiede, wirken, in Richtung der geringeren Konzentration. Der Stoff, der den Festkörper durchdringt, wird Permeat genannt und ist in den vorliegenden Untersuchungen Wasser oder Wasserdampf.

Der Vorgang der Permeation gliedert sich in drei Schritte: Sorption, Diffusion und Desorption (siehe auch Bild 3.2).

- Sorption

Der Begriff der Sorption soll hier zusammenfassend für die Vorgänge der Adsorption und der Absorption benutzt werden und beschreibt die Lösung des

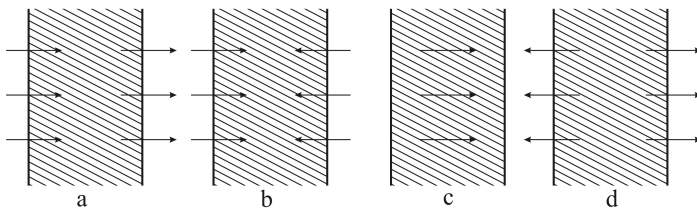


Bild 3.2: Die Permeation und ihre Zwischenschritte am Beispiel einer Wand: a Permeation; b Sorption; c Diffusion; d Desorption.

Permeats im Festkörper. Die Adsorption ist die Anlagerung von Teilchen an der Oberfläche und die Absorption die Aufnahme der Teilchen in den oberflächennahen Bereich des Materials.

- Diffusion

Die Diffusion beschreibt den Vorgang des Transports des Permeats durch den Feststoff hindurch. Dabei können folgende Arten der Diffusion unterschieden werden (siehe Kapitel 3.3): Lösungsdiffusion, Wasserdampfdiffusion und Oberflächendiffusion.

- Desorption

Die Desorption beschreibt die Ablösung oder Ausscheidung des Permeats an der anderen Feststoffseite.

3.3 Diffusion

Diffusion entsteht durch die Eigenbewegung der Moleküle, die sogenannte Brownsche Molekularbewegung [GER 02]. Alle Teilchen in einem Gas weisen laut der kinetischen Gastheorie die mittlere kinetische Energie \bar{E}_{kin} auf, die sich durch die Temperatur T und die Boltzmann-Konstante $k = 1,380\,658 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ zu

$$\bar{E}_{\text{kin}} = \frac{3}{2}kT \quad (3.1)$$

ergibt. Die kinetische Energie ist dabei ein Maß für die Bewegung des Teilchens gemäß dem Zusammenhang

$$\bar{E}_{\text{kin}} = \frac{1}{2}m_{\text{M}}\bar{v}^2 \quad (3.2)$$

mit der Teilchenmasse m_{M} und der mittleren Teilchengeschwindigkeit \bar{v} . Stoßen die Teilchen mit anderen zusammen, so ändern sie ihre Richtung und fliegen bis zum nächsten Zusammenstoß in diese weiter. Besteht ein Konzentrationsgefälle der vorhandenen Teilchen, so wirken auf ein Teilchen im Mittel mehr Stöße in

Richtung niedrigerer Konzentration. Auf Grund der Eigenbewegung und der Zusammenstöße der Teilchen kommt es so nach und nach zu einer Vergleichmäßigung der Konzentration im gesamten Volumen.

In einem Festkörper findet ebenso eine Diffusion statt, sofern sich den bewegenden Teilchen eine Aufenthaltsmöglichkeit bietet. Dazu müssen sie im Festkörper gelöst sein, man spricht von der Lösungsdiffusion. Vereinfachend wird oftmals auch dann von einer Diffusion in einem Festkörper gesprochen, wenn der eigentliche Diffusionsprozess in Gasräumen im Festkörper stattfindet, wie dies bei der Wasserdampfdiffusion oder der Oberflächendiffusion der Fall ist.

Im Folgenden sind diese Diffusionsarten näher beschrieben:

- Lösungsdiffusion

Die Moleküle des Permeats gehen eine Lösung mit dem jeweiligen Feststoff ein. Die Wärmebewegung der Moleküle des Feststoffes erlaubt es dann den Molekülen des Permeats, sich durch die inter- oder intramolekularen Zwischenräume in Richtung des Konzentrationsgefälles fortzubewegen. Wenn die Moleküle des Permeats genügend Energie aufweisen, um die Kräfte, die sie in ihrem Umfeld festhalten, zu durchbrechen, springen sie somit von Zwischenraum zu Zwischenraum [MEN 02]. Diese Energieschwelle wird auch als die benötigte Aktivierungsenergie der Diffusion bezeichnet.

- Wasserdampfdiffusion

Im Allgemeinen beschreibt die Wasserdampfdiffusion die Diffusion von Wasser in Luft. Voraussetzungen für das Einsetzen der Wasserdampfdiffusion sind, neben der Existenz von Wassermolekülen in der betrachteten Luft, hauptsächlich zahlreiche Hohlräume innerhalb des Feststoffes, wie es z. B. bei porösem Material der Fall ist. Die in der Luft vorhandene Feuchtigkeit gelangt in die Porenräume und bewegt sich hier, wie am Anfang des Kapitels beschrieben, durch die Brownsche Molekularbewegung und das Konzentrationsgefälle in einer reinen Diffusion durch Luft. Dieser Mechanismus versiegt, sobald die Porenräume durch Kondensationsvorgänge oder Oberflächendiffusion mit so viel Wasser gefüllt sind, dass kein gasförmiger Feuchtigkeitstransport mehr stattfinden kann.

- **Oberflächendiffusion**

Die zentralen Voraussetzungen bilden auch hier Porenräume. An diesen inneren Oberflächen von Feststoffen lagert sich in jedem Gleichgewichtszustand ein Wasserfilm ab (Adsorption). Bei sehr geringer Luftfeuchte ist dieser sehr dünn und wird mit steigender Luftfeuchte dicker. Es findet nun ein Wassertransport innerhalb dieses Wasserfilms hin zur niedrigeren Konzentration statt. Da dieser Vorgang in den gleichen Hohlräumen stattfindet wie die Wasserdampfdiffusion, besteht eine Verbindung zwischen ihnen. Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von bis zu 30 % ist dieser Anteil im Vergleich zu Wasserdampfdiffusion durch die gleichen Hohlräume vernachlässigbar, ab 90 % relativer Luftfeuchte überwiegt dagegen die Oberflächendiffusion, bis die Wasserdampfdiffusion schließlich gänzlich zum Erliegen kommt, da alle Hohlräume durch den angelagerten Wasserfilm bedeckt sind [KLO 74].

Da sich die beiden letztgenannten Arten auf das Vorhandensein von Lufträumen beziehen, besitzen sie für die Betrachtung der Permeation durch GFK nur einen unwesentlichen Wert. Sie treten eher bei der Betrachtung der Dichtung des Flansches auf und wirken hier mit der sogenannten Sickerströmung zusammen und werden im Weiteren deshalb nicht näher betrachtet. Die folgenden Darstellungen beziehen sich auf die Diffusion als Lösungsdiffusion durch den Feststoff.

3.4 Die Fickschen Gesetze

Die ersten Gesetze zur Beschreibung der Diffusion wurden 1855 von Adolf Eugen Fick aufgestellt. Er erkannte, dass Diffusionsprozesse ähnlich der Wärmeleitung in der Thermodynamik ablaufen und übertrug die Gesetzmäßigkeiten entsprechend. Diese Gesetze beschreiben den durch die molekulare Diffusion verursachten Volumenstrom. Sie sind in der Literatur vielfach dargestellt und ihre verschiedenen Formen werden hergeleitet [CRA 95] [NEO 96] [VIE 91]. Hier sollen nur die für das grundsätzliche Verständnis oder diese Arbeit wichtigen Abschnitte dargestellt werden.

Der eindimensionale Fall der Diffusion wird im ersten Fickschen Gesetz durch

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3.3)$$

mit der Teilchenstromdichte J in $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, dem Diffusionskoeffizienten D in m^2/s , der Diffusionsrichtung x und der Konzentration C des diffundierenden Stoffes in g/m^3 beschrieben. Die Teilchenstromdichte in eine bestimmte Richtung ist also proportional zum Konzentrationsgradienten in diese Richtung. Dabei steht die Teilchenstromdichte nach

$$J = \frac{dq}{dt} / A \quad (3.4)$$

für die zeitliche Änderung dt des diffundierenden Stoffes (q) über eine bestimmte Fläche (A).

Das negative Vorzeichen des ersten Fickschen Gesetzes (Gleichung 3.3) zeigt an, dass die Diffusion entgegen der steigenden Konzentration verläuft, also in Richtung niedriger Konzentration. Der Proportionalitätsfaktor D , der Diffusionskoeffizient, kann sowohl konstant sein, als auch abhängig von der Konzentration. Grundsätzlich gilt das Ficksche Gesetz nur für isotrope Materialien, bei denen die Diffusionseigenschaften unabhängig von der Diffusionsrichtung sind.

Betrachtet man nun ein Volumenelement und den Teilchenstrom darin, kann eine Bilanz für den Stofftransport aufgestellt und zu folgender Form

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3.5)$$

vereinfacht werden, die wiederum nur den eindimensionalen Fall betrachtet.

Ist der Diffusionskoeffizient im betrachteten Volumenelement konzentrationsabhängig, ergibt sich:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (3.6)$$

Dies stellt die Sonderform des zweiten Fickschen Gesetzes mit einer Diffusion nur in einer Dimension dar. Allgemein formuliert sich das zweite Gesetz zu

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \operatorname{div} (D \cdot \operatorname{grad} C) \quad . \quad (3.7)$$

Für den Fall eines langen Zylinders, in dem die Diffusion an jedem Punkt als radial angenommen werden kann, ist die Konzentration nur noch eine Funktion des Radius r und der Zeit. Damit vereinfacht sich das zweite Ficksche Gesetz (Gleichung 3.7) zu

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad . \quad (3.8)$$

3.4.1 Der Fall einer Platte

Im Falle einer Platte der Dicke d mit Diffusion nur in einer Richtung lässt sich die Differenzialgleichung des dabei geltenden eindimensionalen Falls sehr leicht lösen. Aus Gleichung 3.5 ergibt sich im konstanten Endfall der Diffusion

$$0 = \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad . \quad (3.9)$$

Integriert man nun zwei Mal und beachtet die Randbedingungen einer Konzentration C_1 bei $x = 0$ an der Oberfläche der Platte und C_2 bei $x = d$ an der gegenüberliegenden Oberfläche, so ergibt sich der, auch aus einfacher Betrachtung ersichtliche, Konzentrationsverlauf $C(x)$ zu

$$C(x) = C_1 + (C_2 - C_1) \cdot \frac{x}{d} \quad . \quad (3.10)$$

Setzt man dies in das erste Ficksche Gesetz nach Gleichung 3.3 ein, so ergibt sich die zugehörige Teilchenstromdichte zu

$$J = (C_1 - C_2) \cdot \frac{D}{d} \quad . \quad (3.11)$$

Hieraus kann man mit Hilfe von Gleichung 3.4 die Stoffmenge q berechnen, die bei einer gegebenen Fläche A in der Zeit t die Wand durchdringt (innerhalb des Feststoffes):

$$q = \frac{A \cdot D \cdot t \cdot (C_1 - C_2)}{d} \quad (3.12)$$

3.4.2 Der Fall eines Zylinders

Im Falle eines hohlen Zylinders oder Rohres mit dem Innenradius a und dem Außenradius b , bei dem die Konzentration an der Innenseite (C_1) (im Feststoff) und an der Außenseite (C_2) (im Feststoff) konstant gehalten wird, lässt sich die Differenzialgleichung 3.8 anhand der gegebenen Randbedingungen lösen und die Konzentration ergibt sich zu:

$$C = \frac{C_1 \ln(b/r) + C_2 \ln(r/a)}{\ln(b/a)} \quad (3.13)$$

Durch Einsetzen in Gleichung 3.3 ergibt sich daraus eine Teilchenstromdichte

$$\begin{aligned} J &= -D \frac{\partial C}{\partial r} \\ &= -D \frac{\partial \frac{C_1 \ln(b/r) + C_2 \ln(r/a)}{\ln(b/a)}}{\partial r} \\ &= -D \cdot \frac{C_2 - C_1}{\ln(b/a) \cdot r} \quad , \end{aligned} \quad (3.14)$$

aus welcher man mit Hilfe von Gleichung 3.4 die Stoffmenge berechnen kann, die pro Längeneinheit l des Zylinders in einer bestimmten Zeit t durch den Zylinder diffundiert (nur innerhalb des Feststoffes):

$$q = \frac{2\pi D t (C_2 - C_1)}{\ln(b/a)} \cdot l \quad (3.15)$$

Ist der Diffusionskoeffizient konzentrationsabhängig, so zeigt sich in einer gemessenen Teilchenstromdichte lediglich der Mittelwert \bar{D} des Diffusionskoeffizienten

$$\bar{D} = \frac{1}{C_2 - C_1} \cdot \int_{C_1}^{C_2} D \, dC \quad (3.16)$$

über die gegebene Konzentrationsverteilung, der dann auch in Gleichung 3.15 anstelle von D steht.

Der Fall des Stabes ist im Gegensatz zum Zylinder ein nichtstationärer Zustand, da sich die Konzentration auf Grund der Ansammlung des Permeats im Stabinnen ständig ändert. Eine einfache Lösung der Differenzialgleichungen ist hier nicht möglich.

3.4.3 Löslichkeit

Wird ein Polymer in einem Gas gelagert, so entsteht ein Gleichgewicht zwischen den im Polymer gelösten und den in der Gasphase befindlichen Teilchen. Es besteht dann eine Verbindung zwischen dem Partialdruck des permeierenden Gases p und der Konzentration des Gases im Feststoff C nach dem Henryschen Gesetz

$$C = S \cdot p \quad (3.17)$$

durch die Löslichkeit S . Mit der Löslichkeit lässt sich nun auch der sogenannte Permeationskoeffizient P beschreiben. Er setzt sich aus dem Produkt des Diffusionskoeffizienten D und der Löslichkeit S zusammen:

$$P = D \cdot S \quad (3.18)$$

Mit Hilfe dieser beiden Zusammenhänge bestimmt sich die Stoffmenge Q , die beim Konzentrationsunterschied $\Delta C = S \cdot \Delta p$ durch eine Zylinderwand permeiert,

aus Gleichung 3.15 zu

$$Q = \frac{2\pi P t \Delta p}{\ln(b/a)} \cdot l \quad . \quad (3.19)$$

Diese Gleichung unterscheidet sich insofern von Gleichung 3.15, als dass hier auch die Aufnahme des Permeats aus der umgebenden Luft betrachtet wird und nicht nur der Transport innerhalb des Feststoffes.

Eine entsprechende Betrachtung lässt sich auch für die Permeation durch eine Platte vornehmen.

3.4.4 Permeation von Dämpfen

Die vorhergehenden Abschnitte gehen von einem inerten Gas als Permeat aus. Im untersuchten Anwendungsfall permeiert jedoch Wasserdampf, welcher mit dem Polymer in Wechselwirkung treten kann. Dies führt hauptsächlich zur Quellung des Polymers. Hierdurch werden die Koeffizienten wie Lösungskoeffizient $S(C)$ und Diffusionskoeffizient $D(C)$ und damit auch der Permeationskoeffizient $P(C)$ konzentrationsabhängig. Auch das Henrysche Gesetz gilt dann nicht mehr. Diese Einflüsse sind jedoch unterhalb der Glasübergangstemperatur wesentlich geringer als darüber [MEN 02]. Da die untersuchten Epoxidharze unterhalb der Glasübergangstemperatur nur sehr wenig quellen, ist mit den dargestellten Formeln trotzdem eine näherungsweise Betrachtung möglich.

3.5 Nicht-Ficksche Diffusion

In Polymeren können die Fickschen Gesetze meist nur oberhalb der Glasübergangstemperatur (siehe Kapitel 2.2.2.1), im gummielastischen Bereich des Polymers, angewendet werden. Unterhalb der Glasübergangstemperatur, im Glasbereich des Polymers, verhält sich die Diffusion anders, dies wird oft als anomale oder Nicht-Ficksche-Diffusion bezeichnet [CRA 95]. Diese Abweichung resultiert aus der wesentlich geringeren Kettenbeweglichkeit der Polymere unterhalb der

Tabelle 3.1: Unterscheidungen der Diffusionsarten nach Formel 3.20 [NEO 96].

$n > 1$	supercase II
$n = 1$	case II
$1/2 < n < 1$	anomalous
$n = 1/2$	Fickian
$n < 1/2$	pseudo-Fickian

Glasübergangstemperatur oder, allgemein formuliert, aus der Änderung der Relaxationszeiten, die mit der strukturellen Änderung einhergehen. Die Relaxationszeit ist die Zeit, die das Material benötigt, um nach einer Veränderung wieder stationäre Bedingungen zu erreichen (siehe auch Kapitel 2.2.2.1). Alle Relaxationszeiten der Polymere vergrößern sich bei verringerter Temperatur und damit verringerter Beweglichkeit der Ketten. Insofern sind Polymere unterhalb der Glasübergangstemperatur weder isotrop noch homogen und nicht im lokalen Gleichgewicht [NEO 96]. Dies sind jedoch Voraussetzungen für die Gültigkeit der Fickschen Gesetze.

Es gibt zwei typische Verläufe der Nicht-Fickschen Diffusion, die hauptsächlich anhand der Sorptionskurve der Materialien beschrieben wird. In einem Fall ist die Masseaufnahme proportional zur Zeit anstatt zur Wurzel der Zeit, und die Konzentration weist eine sehr klare und eindeutige, aber anscheinend unstetige Front auf, die sich mit einer konstanten Geschwindigkeit durch das Material bewegt [NEO 96]. Dieser Fall lässt sich mit folgendem Zusammenhang ausdrücken:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = k_n \cdot t^n \quad . \quad (3.20)$$

Dabei ist M_t die Stoffmenge, die bis zu einem bestimmten Zeitpunkt t aufgenommen wurde, M_∞ die Endmenge des Gleichgewichtszustandes, k_n eine Konstante für den jeweiligen Prozess, abhängig von Material, Permeat und den Randbedingungen, und n eine Variable, die die verschiedenen Ausprägungen des Diffusionsverhaltens beschreibt. Dabei werden die Ausprägungen nach Tabelle 3.1 unterschieden.

Im zweiten Fall der Nicht-Fickschen Diffusion ist der Verlauf der normierten Masseaufnahme sigmoid. Des Weiteren gibt es auch das sogenannte Zwei-Schritt-

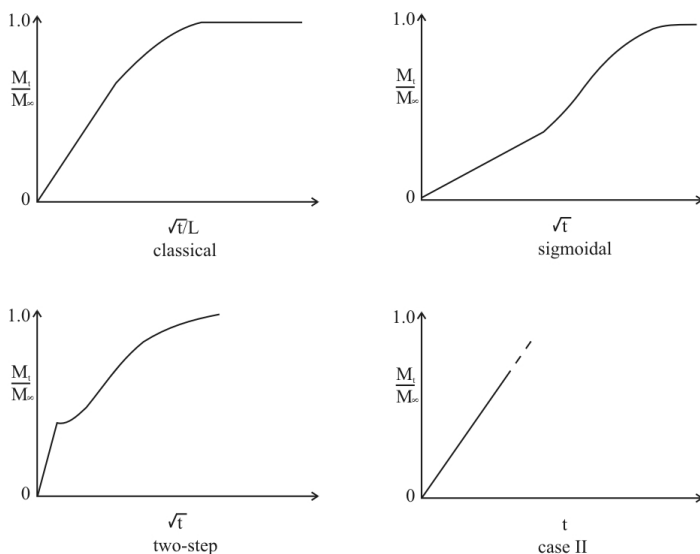


Bild 3.3: Verschiedene Verläufe der Diffusion anhand der Kurven der normierten Massenaufnahme [NEO 96].

Verhalten, bei dem sich zwei der anderen Fälle zu überlagern scheinen. Verschiedene Verläufe sind beispielhaft in Bild 3.3 dargestellt. Die genauen Gründe und Verläufe für dieses Nicht-Ficksche-Verhalten der Diffusion sind noch nicht im Detail bekannt. Sie sind sicherlich unter anderem auf die Wechselwirkung des Permeats mit dem Polymer und die dadurch bedingten Systemänderungen, z. B. durch Quellung, wie auch auf die Inhomogenität des Polymers zurückzuführen.

In vielen Fällen lassen sich jedoch durch die Anwendung der Fickschen Gesetze auch auf Nicht-Ficksche-Diffusionsprozesse trotzdem gute Näherungen erzielen [SCH 93] [NEO 96] [MEN 02].

3.6 Temperaturabhängigkeit der Permeation

Im Allgemeinen können chemische Reaktionen durch die Erhöhung der Prozesstemperatur beschleunigt werden. Die von Svante Arrhenius aufgestellte und nach

ihm benannte Arrhenius-Gleichung formuliert in der chemischen Kinetik diese quantitative Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k von der Temperatur T

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_A}{RT}} \quad (3.21)$$

in Abhängigkeit eines Frequenzfaktors A , der Aktivierungsenergie E_A und der allgemeinen Gaskonstante $R = 8,314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$. Die Arrhenius-Gleichung baut auf der Stoßtheorie auf. Da eine Erhöhung der Temperatur zu einer Steigerung der mittleren Beweglichkeit und damit zu größerer Energie führt, wird das Erreichen der Aktivierungsenergie beschleunigt.

Übertragen auf den Vorgang des Stofftransports lässt sich feststellen, dass sowohl die Diffusion als auch die Sorption wärmeaktivierte Prozesse sind. Bei einer höheren Temperatur sind die Ketten des Polymers in einer stärkeren Bewegung, was die Möglichkeiten des Permeats, sich durch das Springen in inter- oder intramolekulare Zwischenräume fortzubewegen, erhöht (siehe auch Kapitel 3.3). Zudem weisen die Moleküle des Permeats eine höhere kinetische Energie auf [MEN 02]. Der wichtige Faktor für diese Beschleunigung ist die benötigte Aktivierungsenergie der Diffusion E_D , die ein Mol Gasteilchen benötigt, um sich zwischen zwei Freiräumen im Feststoff zu bewegen. Wenn E_D selber über den untersuchten Bereich als temperaturunabhängig angenommen wird, lässt sich die Temperaturabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten $D(T)$ wie folgt beschreiben:

$$D(T) = D_0 \cdot e^{-\frac{E_D}{RT}} \quad (3.22)$$

Hierbei ist D_0 eine Diffusionskonstante, die temperaturunabhängig ist und auf der Kombination von Festkörpermaterial und Permeat beruht. Da E_D immer positiv ist, erhöht sich der Diffusionskoeffizient bei steigender Temperatur.

Eine ähnliche Formulierung ergibt sich auch für die Löslichkeit $S(T)$, die ebenfalls temperaturabhängig ist. Die Löslichkeit wird einerseits durch die exotherme Kondensation des Gases an der Oberfläche und andererseits durch die endotherme Mischung von Gas und Polymer bestimmt [MEN 02]. Diese Reaktionen werden ge-

meinsam als Lösungsenthalpie ΔH_S beschrieben, also als die Änderung der Enthalpie beim Auflösen des Permeats im Feststoff. Anders als die Aktivierungsenergie der Diffusion E_D kann die Lösungsenthalpie ΔH_S einer bestimmten Gas-Polymer-Kombination sowohl positiv als auch negativ sein. Mit der Löslichkeitskonstante S_0 kann nun die Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit $S(T)$ als

$$S(T) = S_0 \cdot e^{-\frac{\Delta H_S}{RT}} \quad (3.23)$$

beschrieben werden.

Aus Gleichung 3.18 ergibt sich somit der temperaturabhängige Permeationskoeffizient $P(T)$ zu

$$\begin{aligned} P(T) &= D(T) \cdot S(T) = D_0 \cdot e^{-\frac{E_D}{RT}} \cdot S_0 \cdot e^{-\frac{\Delta H_S}{RT}} \\ &= D_0 \cdot S_0 \cdot e^{-\frac{E_D + \Delta H_S}{RT}} = P_0 \cdot e^{-\frac{E_P}{RT}} \end{aligned} \quad (3.24)$$

mit der temperaturunabhängigen Permeationskonstante $P_0 = D_0 \cdot S_0$ und der Aktivierungsenergie der Permeation $E_P = E_D + \Delta H_S$.

3.7 Diffusionswiderstandszahl

Die Diffusionswiderstandszahl μ beschreibt einen Faktor, um den ein Material die Diffusion gegenüber jener in Luft vermindert. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Diffusion durch diesen Stoff genau wie die Diffusion in der Luft den Gasgesetzen und den Fickschen Gesetzen folgt und die Versuchsbedingungen, z. B. gleiche Dicke, gleiche Temperatur und gleiches Partialdruckgefälle, über den betrachteten Bereich mit und ohne Stoff gleich sind. Demnach ist die Diffusionswiderstandszahl μ durch

$$\mu = \frac{J_D}{J} \quad (3.25)$$

beschrieben, mit der Teilchenstromdichte in Luft J_D und der Teilchenstromdichte im betrachteten Stoff J .

Diese Darstellung der Diffusion findet hauptsächlich in der Bauphysik ihre Anwendung [KLO 74] [SED 02]. Die hierbei üblichen Formeln benutzen andere Einheiten und Darstellungsformen, entsprechen jedoch den im Kapitel 3.4 vorgestellten. Dies soll kurz anhand der Grundgleichung gezeigt werden. Betrachtet man die Lösung für die Teilchenstromdichte in einer Platte, Gleichung 3.11, und fügt die Löslichkeitsbetrachtung aus Kapitel 3.4.3 hinzu, so ergibt sich die Permeation durch eine Platte zu

$$J = (p_1 - p_2) \cdot \frac{P}{d} \quad . \quad (3.26)$$

Die Entsprechung der Bauphysik beschreibt die Dampfstromdichte m_D in $\text{kg}/(\text{m}^2\text{h})$ anstelle der Teilchenstromdichte J in $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ in Abhängigkeit vom Wasserdampfdiffusionsleitfähigkeitswert des Materials δ_M oder der Luft δ_L in $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa})$ statt des Permeationskoeffizienten P in $\text{m}^2/(\text{s} \cdot \text{Pa})$:

$$m_D = \delta_M \cdot \frac{p_1 - p_2}{d} = \frac{\delta_L}{\mu_M} \cdot \frac{p_1 - p_2}{d} \quad . \quad (3.27)$$

Zur Berechnung wird nun noch der Wasserdampfdiffusionsleitfähigkeitswert der Luft benötigt, der mit $\delta_L = 6,76 \cdot 10^{-7} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa})$ anzunehmen ist [SED 02].

3.8 Permeations- und Diffusionsraten

Für die Ermittlung von Permeations- und Diffusionsraten stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, die für die vorliegenden Untersuchungen teilweise ungeeignet sind. Insbesondere die Bestimmung der Gasdurchlässigkeit nach [DIN 53 536] und der Wasserdampfdurchlässigkeit nach [DIN 53 122] ist auf Grund der Dicke der zu untersuchenden Materialien, der Formgebung oder aufgrund der zu erwartenden geringen Permeations- und Diffusionsraten nicht möglich.

Weiterhin sollte in diesen Untersuchungen nicht ein Permeationskoeffizient für GFK bestimmt, sondern die Menge des eindringenden Wassers durch das Gesamtsystem Komposit-Hohlisolator ermittelt werden. Aus dieser lässt sich aber auch auf eine Permeationsmenge für den Anteil des GFK-Rohres schließen.

3.8.1 Permeationsraten aus Komplettmessung

Setzt man einen verschlossenen Zylinder einer gegebenen Luftfeuchtigkeit aus und hält das Innere auf einer abweichenden Luftfeuchtigkeit, so stellt sich nach einiger Zeit ein stetiger Konzentrationsverlauf nach Kapitel 3.4.2 ein. Daraus ergibt sich eine bestimmte Teilchenmenge, die in einer bestimmten Zeit von außen nach innen durch den Zylinder permeiert, wie dies in Gleichung 3.19 gezeigt wird. Diese Menge lässt sich messen und erlaubt somit bei bekannten Abmessungen und Partialdrücken einen Rückschluss auf den Permeationskoeffizienten des Zylindermaterials. Da die genannte Gleichung jedoch nur die Permeation durch die Zylinderwand beachtet, sind alle anderen Permeationsmengen, die laut Kapitel 3.1 im zu untersuchenden Fall vorliegen, vor der Anwendung abzuziehen. Die Innenraumluftfeuchte wird, wie in Kapitel 4.4.2 noch dargelegt wird, auf 0 % gehalten. Im gleichen Kapitel wird auch die Bestimmung der Teilchenmenge Q beschrieben.

3.9 Literaturwerte zur Diffusion und Permeation

3.9.1 Bisherige Messungen am Gesamtsystem Komposit-Hohlisolator

Am Gesamtsystem Komposit-Hohlisolator wurden bisher nur wenige Untersuchungen vorgenommen. Die meisten Erkenntnisse beziehen sich auf Materialproben und sind im Kapitel 3.9.3 dargestellt. Die Untersuchungen am Gesamtsystem erfolgten nur als Vergleichsmessungen zwischen dem bekannten System Porzellan-Isolator und dem »neuen« System Komposit-Hohlisolator, da es in den meisten Fällen lediglich darum ging, zu zeigen, dass Komposit-Hohlisolatoren nicht »undichter« sind, als die bekannten und bewährten Porzellan-Isolatoren.

In [AMS 84] wurde ein Vergleich eines Komposit- und eines Porzellan-Hohlisolators vorgenommen. Beide waren mit dem Isoliergas SF_6 (Schwefelhexafluorid) befüllt (kein Trockenmittel), gleichartig mit einem Dichtring verschlossen und wurden unter realen Freiluftbedingungen bei Temperaturen zwischen -25°C und $+35^\circ\text{C}$ und relativen Luftfeuchten zwischen 50 % und 100 % gelagert. Da kein Druck angegeben wird, ist von 1 bar auszugehen. Der Taupunkt des SF_6 wurde

gemessen, und es zeigten sich im Verlauf von 3 Jahren keine nennenswerten Unterschiede zwischen dem Komposit- und dem Porzellan-Hohlisolator. Aus dem gezeigten Diagramm lässt sich eine Taupunktverminderung um 5 Kelvin vom zwanzigsten Tag der Lagerung bis zum zweihundertsten Tag ablesen. Danach steigt der Taupunkt bis zur Messung nach tausend Tagen Gesamtlagerdauer wieder um 2 Kelvin an. Ohne eine Angabe zur Temperatur, bei der diese Messung stattfand, ist daraus jedoch kein Rückschluss auf eine Feuchteänderung möglich.

[HAM 83] und [WEL 83] nehmen eine Lagerung bei ca. 20 °C unter 80 % bis 90 % relativer Feuchte und mit einer SF₆-Befüllung von 3 bar Überdruck an einem Komposit- und einem Porzellan-Hohlisolator im Vergleich vor. Die Hohlisolatoren enthielten kein Trockenmittel, da der Taupunktanstieg als Maß für die eindringende Feuchtigkeit herangezogen wurde. Es zeigt sich ein fast paralleler Verlauf des Taupunktanstiegs, welcher nach etwa 2 Jahren eine Zunahme um ca. 30 Kelvin aufweist. Liest man die Werte für den Komposit-Hohlisolator aus dem Diagramm ab, ergibt sich ein Anfangstaupunkt von -35 °C. Dies entspricht in SF₆ bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C einer absoluten Feuchte von 0,166 g/m³. Nach 20 000 h liegt der Taupunkt bei -5 °C, was einer absoluten Feuchte von 2,970 g/m³ entspricht. Dies ist somit eine Steigerung um 2,804 g/m³. Die gegebenen Werte für ein Innenraumvolumen von ca. 4,6 l und einen Innendurchmesser von 140 mm lassen auf eine Rohrhöhe von 30 cm schließen. Es ist somit 12,9 mg Feuchtigkeit über eine Permeationsfläche von 0,145 m², die sich aus dem mittleren Durchmesser von 154 mm ergibt, eingedrungen. Dies sind $4,46 \cdot 10^{-6}$ g/(m² · h). Auf das in dieser Arbeit betrachtete Rohr von 1,495 m Länge und 80 mm mittlerem Radius übertragen wären das $3,35 \cdot 10^{-3}$ mg/h.

3.9.2 Eine Diffusionswiderstandszahl aus der Bauphysik

Laut [BAL 80] ist die Diffusionswiderstandszahl von glasfaserverstärktem Epoxidharz mit $\mu_M = 198\,000$ anzunehmen. Weitere Angaben zum Epoxidharz oder zur Art der Glasfaserverstärkung stehen hierbei nicht zu Verfügung. Hieraus lässt sich

mit Gleichung 3.27 eine Dampfstromdichte für folgende Randbedingungen, die den Versuchsbedingungen entsprechen, berechnen. Mit einer relativen Außenluftfeuchte von 100 % und einer relativen Innenluftfeuchte von 0 % bei einer Temperatur von 80 °C und einer Wandstärke von 6 mm ergibt sich somit eine Dampfstromdichte von $m_D = 269,6 \cdot 10^{-7} \text{ kg}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$. Bei einem mittleren Durchmesser von 160 mm und einer dem Klima ausgesetzten Materiallänge von 1,495 m wären dies 20,26 mg/h. Die Temperatur geht in diese Berechnungen über den sich ändernden Wasserdampf-sättigungsdruck ein. Bei einer geringeren Temperatur von 40 °C ergibt sich somit nur eine Dampfstromdichte von $m_D = 42,0 \cdot 10^{-7} \text{ kg}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ und somit 3,16 mg/h

3.9.3 Weitere Literaturwerte und Erkenntnisse

Wenn im Weiteren Werte in Formeln eingesetzt werden, um Ergebnisse zur Abschätzung zu erhalten, so geschieht dies mit den Abmessungen für die GFK-Rohranteile der untersuchten Komposit-Hohlisolatoren, sofern dies nicht gesondert anders angegeben ist. Dies sind: Innendurchmesser $2a = 154 \text{ mm}$, Außendurchmesser $2b = 166 \text{ mm}$, Länge $l = 1,495 \text{ m}$. Die Klimawerte sind vereinfachend gewählt: relative Luftfeuchte innen $\varphi_1 = 0 \%$, relative Luftfeuchte außen $\varphi_2 = 100 \%$.

Nach [MEN 02] liegt die Lösungsenthalpie ΔH_S von Wassermolekülen im Bereich von 25 kJ/mol bei unpolaren Polymeren und 40 kJ/mol für polare Polymere. Epoxidharze zählen zu den polaren Polymeren.

Nach [KLO 74] gilt für die Wasserdampfdiffusion in Epoxidharzfilmen (d. h. sehr dünnen Schichten) ein konzentrationsabhängiger Diffusionskoeffizient, der mit steigender Konzentration abnimmt. Für eine Differenz der relativen Luftfeuchte zwischen 0 % und 100 % wird der zugehörige mittlere Diffusionskoeffizient mit $\bar{D} = 0,67 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ angegeben.

In unidirektional glasfaserverstärkten Polymeren erfolgt nach [KUM 05 I] die Diffusion in Richtung parallel zur Faser schneller als in Richtung senkrecht zu den

Fasern. Es werden durchschnittliche Diffusionskoeffizienten für Epoxidharz mit E-Glasfasern zur Verstärkung von $\bar{D} = 0,71 \pm 0,11 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$ und für Verstärkungen mit ECR-Gläsern mit vielen oder wenigen Fehlstellen im Glas von $\bar{D} = 1,19 \pm 0,30 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s} \dots 0,54 \pm 0,23 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$ angegeben.

In [YAM 81] wird für anhydridsäuregehärtete Epoxidharze ein Diffusionskoeffizient von $D = 8,8 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$, eine Löslichkeit von $S = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ g}/(\text{cm}^3 \cdot \text{cmHg})$ und ein Permeationskoeffizient von $P = 1,32 \cdot 10^{-11} \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{cmHg})$ angegeben. Diese Werte wurden mit 2 mm dicken Platten ermittelt. Die Wasserdampfdurchlässigkeit (WVT) nach [ASTM E 96] wird mit $11,3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h})$ vermerkt.

Setzt man den gegebenen Permeationskoeffizienten in Gleichung 3.19 ein, so ergibt sich eine permeierende Gesamtmenge von $Q/t_{80^\circ\text{C}} = 21,14 \text{ mg/h}$ bzw. $Q/t_{40^\circ\text{C}} = 3,29 \text{ mg/h}$. Betrachtet man die gegebene Wasserdampfdurchlässigkeit und setzt die Rohroberfläche ein, so ergibt sich eine Menge von $353,82 \text{ mg/h}$, die sich jedoch auf Grund der Definition auf eine Partialdruckdifferenz von 1 bar bezieht. Die für die anderen Berechnungen angesetzten Verhältnisse (s. o.) bedingen jedoch nur eine Partialdruckdifferenz von 0,47 bar bei 80°C bzw. 0,07 bar bei 40°C .

In [ALV 07] werden Aktivierungsenergien für die Diffusion durch ein reines Epoxidharz und ein glasfaserverstärktes Epoxidharz angegeben. Die Messungen wurden an 2 mm dicken Platten vorgenommen. Beim untersuchten Epoxidharz handelt es sich um ein Bisphenol-A-Harz, welches jedoch mit einem Amin- statt einem Anhydrid gehärtet wurde. Das Kompositmaterial wurde mit E-Glas-Matten handgefertigt und hatte einen Glasgehalt von 30 %. Die angegebenen Werte für die Aktivierungsenergie der Diffusion sind $E_{D,EP} = 23,9 \text{ kJ/mol}$ für das reine Harz und $E_{D,GFK} = 11,6 \text{ kJ/mol}$ für das GFK.

3.9.4 Diskussion der Literaturwerte

Der Vergleich der in der Literatur gegebenen Diffusionskoeffizienten in Tabelle 3.2 zeigt, dass die Diffusionseigenschaften und somit auch die Diffusionsmengen bei

Tabelle 3.2: Vergleich von Diffusionskoeffizienten aus der Literatur.

Quelle	Diffusionskoeffizient in $10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$	Kommentar
[KLO 74]	$\bar{D} = 0,67$	Epoxidharzfilme
[KUM 05 I]	$\bar{D} = 0,71 \pm 0,11$	EP mit E-Glasfasern
	$\bar{D} = 1,19 \pm 0,30$	EP mit ECR-Gläsern mit vielen Fehlstellen
	$\bar{D} = 0,54 \pm 0,23$	EP mit ECR-Gläsern mit wenigen Fehlstellen
[YAM 81]	$D = 0,88$	

Tabelle 3.3: Vergleich von Werten bezüglich der eindringenden Feuchtigkeitsmenge aus der Literatur.

Quelle	eindringende Feuchtemenge			
	bei 20°C	in 40 a	bei 40°C	in 40 a
[HAM 83]	$3,35 \cdot 10^{-3} \text{ mg/h}$	1,2 g		
[BAL 80]	1,00 mg/h	350,39 g	3,16 mg/h	1,11 kg
[YAM 81] P	1,04 mg/h	365,63 g	3,29 mg/h	1,15 kg
[YAM 81] WVT			$\approx 0,07 \cdot 353,82 \text{ mg/h}$	$\approx 8,68 \text{ kg}$

unterschiedlichen Harzen, Gläsern oder auch Schichtdicken unterschiedlich sind. Insofern lassen sich die Werte aus der Literatur nicht ohne weiteres auf heutige Epoxidharzformulierungen oder GFK übertragen. Die Größenordnung ist jedoch mit $10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ in allen Quellen gleich. Ohne eine weitere Angabe zur Löslichkeit (siehe Kapitel 3.4.3) lässt sich daraus jedoch keine direkte Permeationsmenge berechnen.

Tabelle 3.3 vergleicht die Angaben, aus denen sich eindringende Wassermengen berechnen lassen. Hier zeigt sich eine größere Abweichung der Werte untereinander. Die Menge der eindringenden Feuchtigkeit unterscheidet sich um mehrere Größenordnungen.

Es zeigt sich somit, dass es nicht ausreicht, den Diffusionsprozess im EP bzw. GFK zu betrachten, sondern es ist auch die Aufnahme des Wassers an der Materialoberfläche zu beachten. Um die Wasserdampfdichtigkeit eines Komposit-Hohlisolators

zu beurteilen, ist es somit wichtig, die Permeation durch das GFK als Gesamtprozess zu betrachten. Dass die Literaturwerte hier jedoch keine ausreichenden Bezugspunkte bieten, sieht man an den abgeschätzten Werten für eine Gerätelebensdauer von 40 Jahren. Es wurde mit einer Temperatur von 40 °C gerechnet, was nach [IEC GUIDE 111] und [IEC 60721-1] die höchste normale Umgebungslufttemperatur ist, denen Isolatoren im Einsatz ausgesetzt sind, sowie der vereinfachenden Annahme von 0 % und 100 % relativer Luftfeuchtigkeit. Da die Werte nach [HAM 83] keine Berechnung für 40 °C ermöglichen, sind zum Vergleich auch Werte für 20 °C berechnet, soweit dies möglich ist. Geräte mit Komposit-Hohlisolatoren in Größen wie den hier berechneten sind seit Jahrzehnten erfolgreich im Einsatz. Feuchtigkeitsmengen im kg-Bereich, wie sie sich aus den Literaturwerten ergeben, sind hier keinesfalls gegeben.

Des Weiteren sind die zitierten Untersuchungen von Materialproben an Platten vorgenommen worden, welche eine abweichende Geometrie gegenüber Rohren aufweisen. Zudem waren diese Platten mit einer maximalen Dicke von 2 mm wesentlich dünner als die Wandstärke der meisten Komposit-Hohlisolatoren. Die untersuchten Komposit-Hohlisolatoren weisen eine Wandstärke von 6 mm, bzw. eine reduzierte Wandstärke von 4 mm auf.

Die Werte und Erkenntnisse aus der Literatur bezüglich der Wasserdampfdichtigkeit von Komposit-Hohlisolatoren bzw. der Komponente GFK-Rohr sind stark unterschiedlich und liefern teilweise unrealistische Ergebnisse. Im Fall der Untersuchung eines Komposit-Hohlisolators ist die statistische Basis mit nur einem Prüfkörper sehr gering. Generell gibt es zu wenige Daten, die sich auf die konkreten Bedingungen, wie sie bei Komposit-Hohlisolatoren vorliegen, beziehen. Isofern ist es unumgänglich, Untersuchungen am Gesamtsystem eines realen Komposit-Hohlisolators durchzuführen, um sinnvoll Werte abschätzen zu können.

4 Versuchseinrichtungen und -verfahren

Für die durchzuführenden Versuche war es notwendig, verschiedene neue Versuchseinrichtungen zu entwickeln. Ihre Realisierung wird in diesem Kapitel beschrieben. Auch die entwickelten und verwendeten Versuchsverfahren für die durchgeführten Versuche werden in diesem Kapitel dargestellt.

4.1 Wasser

Im Idealzustand ist Wasser in Komposit-Hohlisolatoren nur in sehr geringem Maße vorhanden. In dieser Arbeit stellt Wasserdampf jedoch die untersuchte Hauptbelastung der Komposit-Hohlisolatoren bzw. der einzelnen Komponenten und Materialien dar. Aus diesem Grunde ist Wasser in allen Versuchseinrichtungen vorhanden. In Form von Wasserdampf tritt es in den Versuchskammern (siehe Kapitel 4.4) und als flüssiges Lagermedium in den Stab- und Rohrlagerungseinheiten (Kapitel 4.2 und 4.3) auf.

Wasser (H_2O) ist eine polare Flüssigkeit, die bei Raumtemperatur langsam verdunstet. Da »normales« Wasser jedoch 0,01 bis 0,2 % gelöste Substanzen enthält, zum größten Teil Calcium- und Magnesiumverbindungen, und auch Verschmutzungen aufweist, wird zur Lagerung von Prüflingen (Kapitel 4.2, 4.3 und 4.4.1) in Anlehnung an [DIN EN ISO 62] deionisiertes Wasser verwendet, um eine Beeinflussung und Verschmutzung durch diese Stoffe zu vermeiden. Als deionisiertes Wasser wird solches bezeichnet, das durch einen Ionenaustauscher vollentsalzt wurde [HOL 64].

Das für die Versuche und die Wasserlagerung verwendete deionisierte Wasser weist einen Leitwert unter $10 \mu\text{S}/\text{cm}$ auf.

4.2 Stablagerungseinheit

Um Untersuchungen an reinen Materialproben durchzuführen, wird eine Wasserlagerungseinheit für Stabmaterial benötigt. Es wird darin das Stabmaterial eines Komposit-Langstabisolators untersucht. Es besteht aus den gleichen Materialien wie auch das in Hohlisolatoren verwendete GFK-Rohrmaterial, jedoch sind die Glasfasern längs im Stab angeordnet und nicht, wie im Rohr, gewickelt. Um möglichst nur das radiale Eindringen von Wasser zu ermöglichen, sind die Enden der Stababschnitte außerhalb des Wassers zu lagern. Dies ist wichtig, da das Eindringen des Wassers an den offenen Schnittstellen schneller vonstatten geht als radial. Dies ist durch den beschleunigten Wassertransport entlang der Glasfaser zu erklären. Bisherige Wasserlagerungsversuche an Komposit-Langstabmaterial [SCH 93] erfolgten oft komplett von Wasser umgeben und sind somit nicht ungeprüft übertragbar.

Die Wasseraufnahme der Stabprüflinge wird durch Wägung bestimmt. Dazu werden die Stäbe in größer werdenden Abständen der Lagerungseinheit entnommen, getrocknet, gewogen und innerhalb einer halben Stunde wieder eingelagert.

Die Lagerungseinheit (Bild 4.1) besteht aus einer Box mit quadratischer Grundfläche aus eloxiertem Aluminium und ist mit Bohrungen geringfügig größer als der Stabdurchmesser versehen. Somit ragen die Enden der Stäbe auf beiden Seiten aus der Lagerungseinheit heraus. Sie werden gegen die Box mit Schraubdichtungen abgedichtet. Die Enden der Stäbe sind jetzt lediglich der Feuchte der umgebenden Luft ausgesetzt. Um die Wasseraufnahme an den Stirnseiten weiter zu verringern, werden die Stäbe vor der Lagerung an den Enden mit einer dünnen Epoxidharzschicht versiegelt. So liegen die Glasfasern nicht direkt frei an der Umgebungsluft mit unkontrollierter Feuchte.

Für die Lagerung bei erhöhter Temperatur werden die metallischen Einheiten mit Heizmanschetten beheizt. Diese werden oberhalb und unterhalb der eingelagerten Stäbe um die Einheit herumgespannt und geregelt beheizt. Anstelle eines Stabes wird an einer zentralen Position eine Temperatursonde eingebracht, welche über einen Regler die Heizleistung der Manschetten und damit die Wassertemperatur bestimmt.



Bild 4.1: Eine beheizbare Lagerungseinheit für GFK-Stäbe.

Als Lagermedium wird entionisiertes Wasser verwendet, da dieses dem Wasseraufnahmeverhalten bei feuchter Luft am nächsten kommt [STI 84]. Dieses wird zur Entnahme der Prüfstäbe teilweise aus dem Behälter abgelassen, aufgefangen und nach dem Wiedereinbau der Prüflinge wieder eingebracht.

Zur Vorbereitung der Messung werden die Stäbe auf die entsprechende Länge, passend zu den Prüfbehältern, zugesägt. Dies entspricht bei den verwendeten Versuchsständen 25 cm. Die Stäbe werden dann vorsichtig mit entionisiertem Wasser vom anhaftenden Glasstaub befreit und mit fusselfreiem Papier abgetrocknet. Dann werden die Proben 14 Tage im Ofen bei 70 °C getrocknet und in einem mit Trockenperlen bestückten Exsikator auf Raumtemperatur abgekühlt. Hiernach werden die Stabenden mit Epoxidharz dünn versiegelt und 24 Stunden im Ofen bei 70 °C ausgehärtet. Nach der Abkühlung auf Raumtemperatur im Exsikator sind die Proben einsatzbereit und können nach einer Anfangswägung des Trockengewichts eingelagert werden.

Die Stäbe werden anfangs täglich, bei höheren Temperaturen auch bis zu zweimal täglich, gemessen. Da die Gewichtszunahme mit der Lagerungsdauer geringer

wird, werden die Messabstände mit längerer Lagerdauer vergrößert. Dabei wird die jeweilige Geschwindigkeit des Aufnahmeprozesses beachtet.

4.3 Rohrlagerungseinheit

Entsprechend der Lagerung von GFK-Stabmaterial als Komposit-Langstabisolatoren werden auch Rohrabschnitte des GFK-Rohres von Komposit-Hohlisolatoren in Wasser gelagert und deren Wasseraufnahme bestimmt. Dazu wird analog zur Stablagerungseinheit (Kapitel 4.2) eine Lagerungseinheit für Rohrabschnitte benötigt. Diese soll ebenfalls nur ein radiales Eindringen des Wassers in den Rohrabschnitt ermöglichen und die Stirnseiten der Rohre lediglich der Umgebungsluft aussetzen. Die rechteckigen Aluminiumgehäuse (Bild 4.2) weisen Bohrungen wenig größer als der Außendurchmesser der zu untersuchenden Rohrabschnitte auf. Die Rohre werden gegenüber der Einheit mit Quetschdichtungen gedichtet. Es wird somit lediglich die Außenseite der Rohre dem Wasser ausgesetzt. Die Feuchte der umgebenden Luft und somit auch der Luft an der Innenseite des Rohres wird dokumentiert, um das Dampfdruckgefälle, welches auf den Permeationsprozess wirkt, berechnen zu können. Die Rohre werden genauso wie die Stäbe (Kapitel 4.2) getrocknet, verharzt, gewogen und dann eingelagert. Um unterschiedliche Rohrma-

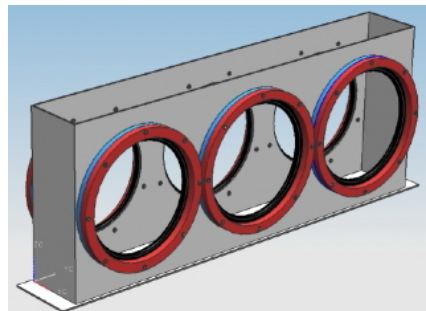
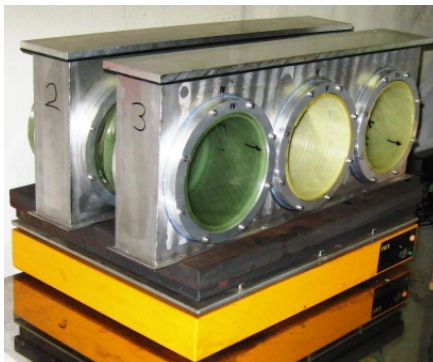


Bild 4.2: Eine beheizbare Lagerungseinheit für GFK-Rohrabschnitte und die technische Zeichnung.

terialien untersuchen zu können, werden mehrere Lagerungseinheiten mit unterschiedlichen Durchmessern benötigt, da die Rohre verschiedener Hersteller, die sich in der GFK-Zusammensetzung oder dem Aufbau unterscheiden, meist auch unterschiedliche Durchmesser aufweisen.

Die Erwärmung des entionisierten Wassers erfolgt über eine Heizplatte, auf welche die gesamte Lagerungseinheit gestellt wird. Es stellt sich eine konstante Temperatur der Heizplatte und somit auch des Gefäßes ein.

Da der Aus- und Einbau der Rohrabschnitte wesentlich aufwendiger ist als bei der Lagereinheit für Stäbe, und da die Wasseraufnahme langsamer vonstatten geht, werden die zeitlichen Abstände der Wägungen größer gewählt als bei den Stäben.

4.4 Versuchskammern

Für die Lagerung des Gesamtsystems des Komposithohlisolators wird ein verhältnismäßig großer Raum benötigt, in welchem das gewünschte, die Untersuchungen beschleunigende, Klima von 80 °C und 95 % relativer Luftfeuchtigkeit vorherrscht. Da eine Klimakammer entsprechender Größe für diese Untersuchungen nicht zur Verfügung steht, werden kleinere Lagerungseinheiten entwickelt, welche jeweils 4 »lange«¹ Versuchskörper aufnehmen können. Alternativ können auf den 4 Prüfplätzen auch bis zu 8 »kurze«¹ Prüfkörper, wenn jeweils 2 Stück aufeinander gestapelt werden, oder eine Kombination aus »kurzen« und »langen« Prüfkörpern in einer Kammer untersucht werden. Diese einzelnen Versuchskammern haben unter anderem auch den Vorteil, dass sie sequenziell bestückt werden können, ohne die anderen Messungen zu unterbrechen, und dass bei einem eventuellen Schadensfall nur ein Teil der Prüflinge betroffen ist.

4.4.1 Gesamtaufbau

Die Versuchskammern (Bild 4.3) bestehen aus gedämmten runden zweiwandigen Polypropylen-Rohren mit einem Innendurchmesser von 85 cm und einer Höhe von 2,3 m. An der Innenseite der Rohre verläuft eine Kupferspirale, durch welche ein

¹ Erläuterungen siehe Kapitel 4.4.4

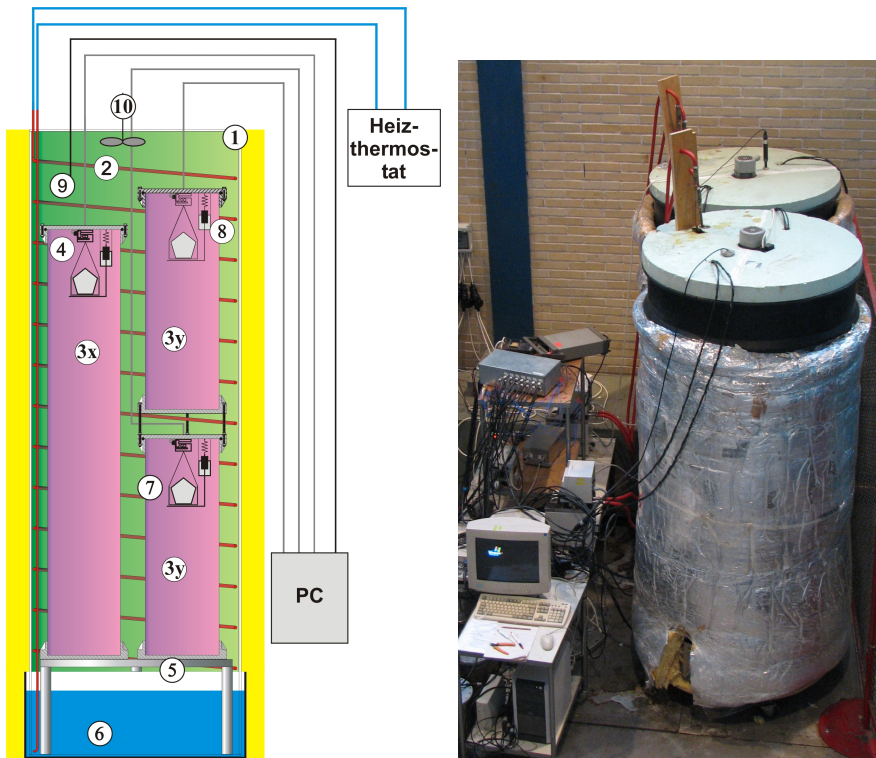


Bild 4.3: Aufbau der Versuchskammern.

1: Gedämmte Kammer; 2: Heizwendel; 3: Probekörper; 4: DMS-Waage; 5: Standtisch; 6: Wasserreservoir; 7: Trockenmittel; 8: Entlastungs-Halterung; 9: Klimamessung; 10: Ventilator

Wärmetransferöl gepumpt wird. Das Wärmetransferöl wird von einem Wärmethermostaten erwärmt. Die Klimaüberwachung erfolgt gesondert. Am Boden der Versuchskammer befindet sich ein Wasserreservoir, welches die notwendige Feuchtigkeit zur Verfügung stellt. In einem geschlossenen Raum stellt sich bei ausreichend vorhandenem Wasser eine relative Luftfeuchtigkeit von 100 % ein [KLO 74]. Auf Grund der gegebenen Undichtigkeiten der Versuchskammern, die z. B. auf Grund der Durchführungen für Messkabel und -sonden unvermeidlich sind, stellt sich

bei den Versuchskammern jedoch nur die gewünschte Luftfeuchtigkeit von ca. $95\% \pm 3\%$ ein. Um die Wasseraufnahme durch die Luft zu erleichtern und vor allem am Beginn des Versuches zu beschleunigen, wird das Wasserreservoir ebenfalls von den Heizspiralen durchlaufen und somit erwärmt. Zur Homogenisierung des Klimas wird an der Deckelinnenseite ein Ventilator angebracht, der eine ständige Umwälzung der Luft, vorbei an der Heizspirale und der Wasseroberfläche, garantiert.

Im Wasserreservoir steht ein metallischer Standtisch, auf dem die Probekörper über dem Wasser plaziert werden. Der Standtisch ist mit Löchern versehen, um die Luftzirkulation durch die Kammer und über die Wasseroberfläche möglichst wenig zu behindern. Der Standtisch ist so ausgelegt, dass er das Gewicht der bis zu 8 kleinen Prüfkörper, auch bei der auftretenden Wärme und trotz der Stabilitätsreduzierung durch Lochbohrungen in der Platte, tragen kann.

Einige Fotos des Aufbaus sind im Anhang A.1 gezeigt.

4.4.2 Die Messung der eingedrungenen Wassermenge

Um zu bestimmen, wie viel Feuchtigkeit in den Probekörper eingedrungen ist, gibt es zwei prinzipielle Möglichkeiten:

- Luftfeuchtheitsmessung
- Gewichtsmessung von eingebrachtem Trockenmittel

Die Luftfeuchtheitsmessung erlaubt eine kontinuierliche Überwachung der Luftfeuchtigkeit im Innenraum des Probekörpers. Die Industrie bietet dafür verschiedene Messverfahren und Sensoren [WEB 95]. Es ist dabei jedoch darauf zu achten, dass der Feuchtesensor bei der geplanten Versuchstemperatur arbeitsfähig ist und der Sensor temperaturkompensiert misst oder die Temperatur direkt misst. Des Weiteren ist zu beachten, dass der Sensor der anfänglich geringen Luftfeuchtigkeit im Probekörperinneren ausgesetzt werden kann, ohne dadurch seine Funktionsfähigkeit zu beeinträchtigen.

Die Gewichtsmessung eines eingebrachten Trockenmittels beruht auf der Tatsache,

dass ein in einen abgeschlossenen Raum eingebrachtes Trockenmittel die Feuchtigkeit der umgebenden Luft komplett aufnimmt. Das Gewicht des Trockenmittels erhöht sich dabei entsprechend der aufgenommenen Feuchtigkeit. Es ist dabei darauf zu achten, dass die Gewichtsmessung temperatur- und langzeitdriftkompensiert stattfindet und dass ausreichend Trockenmittel für die gesamte Messdauer zur Verfügung steht. Des Weiteren ist es wichtig, dass die Waage nicht dauerhaft mit dem Trockenmittel belastet wird, da sich ansonsten bei den langen Versuchszeiträumen eine unvermeidliche Nullpunktdrift durch die Dauerbelastung des Wägemittels erfolgen und die Messergebnisse verfälschen würde.

Das in dieser Arbeit verwendete Messprinzip ist das der Gewichtsmessung eingebrachten Trockenmittels, da dies folgende Vorteile aufweist:

- Industrieüblich werden die untersuchten Komposit-Hohlisolatoren grundsätzlich mit Trockenmittel ausgestattet, um mindestens die durch die O-Ring-Dichtung des Deckels unweigerlich eindringende Feuchtigkeit zu binden. Somit ist es anwendungsnäher, mit Trockenmitteln im Probekörper zu arbeiten. Eine direkte Luftfeuchtemessung ist somit aber nicht mehr möglich, da diese prinzipbedingt auf 0 % r. F. gehalten wird.
- Durch das Einbringen von Trockenmittel wird ein konstantes Dampfdruckgefälle zwischen Innen- und Außenraum des Prüflings gewährleistet. Wird kein Trockenmittel im Probekörperinneren verwendet, steigt die Luftfeuchtigkeit im Inneren langsam an und verringert somit das Dampfdruckgefälle und somit auch eine Ursache der Permeation. Der Vorgang würde also langsamer und schwieriger reproduzierbar ablaufen, was eine längere Versuchszeit zur Folge hätte. Auch würde dies die grundsätzliche Ermittlung eines Permeationskoeffizienten erschweren.
- Durch das konstante Dampfdruckgefälle lassen sich die gemessenen Werte besser in die Berechnungen übertragen und sind somit besser für weitere Aussagen nutzbar.

Für die in dieser Arbeit dargestellten Untersuchungen werden Trockenmittelbeutel mit ca. 80 g Zeolith verwendet. Sie können maximal 50 % des Eigengewichtes

an Wasser aufnehmen. Eine zügige Wasseraufnahme erfolgt bis etwa 30 % des Eigengewichtes. In den DMS-Waagen werden jeweils zwei Trockenmittelbeutel verwendet.

4.4.2.1 Die Gewichtsmessung des eingebrachten Trockenmittels

Als Sensor der Gewichtsmessung wird eine Messzelle mit Dehnungsmessstreifen (DMS) gewählt. Dies erlaubt eine temperaturkompensierte und hängende Messung. Damit ist die Messung am Prüfkörperdeckel angebracht, und es braucht keine Verkabelung über die gesamte Innenlänge des Probekörper vorgenommen zu werden. Die Messung wird mit Hilfe eines Entlastungssystems realisiert, welches dafür sorgt, dass der gewählte Gewichtssensor nur zum Messzeitpunkt mit dem Gewicht des Trockenmittelbeutels belastet wird. Der Aufbau ist Bild 4.4 zu entnehmen. Das Trockenmittel ist in einem Korb untergebracht, um die benötigten Hubwege durch die festen Abmessungen zu verringern. Der Korb ist mit Ketten an der Messzelle aufgehängt und wird im Normalfall durch die Federkraft vom Tablett angehoben und gehalten. Zur Messung wird mittels des Hubmagneten das Tablett nach unten gezogen und die Feder gespannt. Der Korb hängt frei an der DMS-Waage. Um eine eventuelle Nullpunktdrift zu dokumentieren und zu kom-

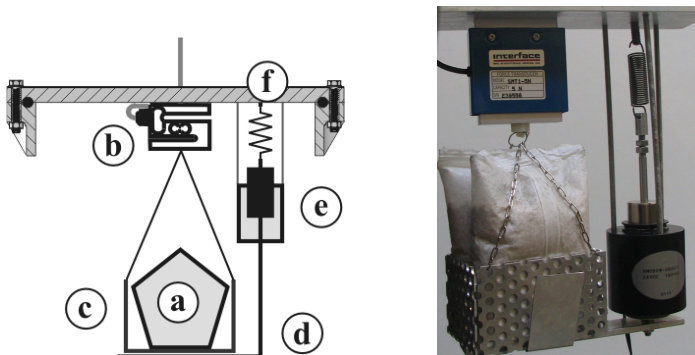


Bild 4.4: Aufbau des Gewichtsmess- und Entlastungssystems.

a: Trockenmittel; b: Messzelle mit Dehnungsmessstreifen; c: Korb; d: Haltetablett; e: Hubmagnet; f: Feder

pensieren, wird vor jeder Gewichtsmessung eine Taramessung im entlasteten Zustand durchgeführt. Erst dann wird die Messzelle belastet und nach Abklingen des Pendelvorgangs des Körbchens das Gewicht aufgenommen. Danach wird der Hubmagnet wieder ausgeschaltet, und durch die Federkraft wird der Korb mit dem Trockenmittel wieder angehoben.

Die Messdurchführung Für diese Art der Messung ist es nötig, sechs Kabel in das Isolatorinnere durch den Deckel einzubringen: zwei für die Versorgung des elektrischen Hubmagneten und vier für die Versorgung und Messwerterfassung der DMS-Waage. Für diesen Zweck wurde eine selbstkonstruierte und erstellte Durchführung (Bild 4.5) genutzt, da kommerziell verfügbare Durchführungen die im Folgenden dargestellten Anforderungen nicht erfüllten.

Die Durchführung sollte aus Aluminium sein, da der Deckel auch aus Aluminium besteht und eine Korrosion auf Grund der elektrochemischen Spannungsreihe an der Dichtfläche vermieden werden muss. Des Weiteren muss die Durchführung

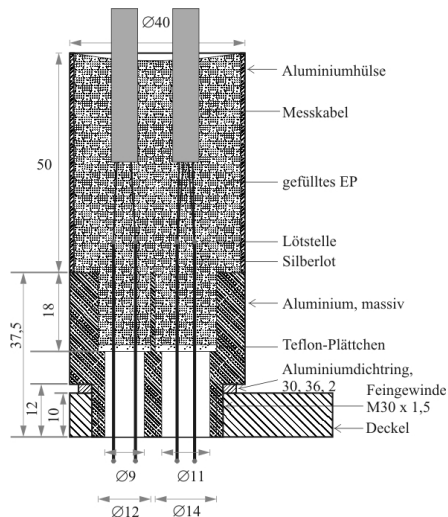


Bild 4.5: Durchführung für Messkabel und Spannungsversorgung in das Innere des Komposit-Hohlisolators.

mit dem Deckel verbunden werden. Am besten wäre ein Glasdurchführung in einer Aluminiumschraube mit Feingewinde zum Einschrauben in den Deckel geeignet. Da diese jedoch auch nach intensiven Bemühungen nicht kommerziell verfügbar ist, wird eine eigene Durchführung konstruiert und hergestellt. Sie wird über eine lange Strecke mit Epoxidharz gedichtet. Die Durchführung besteht aus einer Aluminiumfassung und ist mit einem Feingewinde in den Deckel eingeschraubt. Dabei wird sie mit einem Aluminiumdichtring gegen den Deckel abdichtet. Da ungefülltes Epoxidharz bei den vorliegenden thermischen Änderungen in einer ersten Versuchsreihe einer zu großen Wärmeausdehnung bzw. -schrumpfung unterlag und dadurch die durchgeführten Leitungen beschädigt wurden, wird für die weiteren Untersuchungen eine optimierte Version mit gefülltem Epoxidharz verwendet (EP Araldit D mit 40 % W12). Eine Zeichnung der Durchführung ist in Bild 4.5 zu sehen.

4.4.3 Messtechnische Erfassung

Sowohl die Klimawerte als auch die Messwerte bezüglich des Gewichtsanstiegs des Trockenmittels werden mit einem computergesteuerten Messsystem (PC mit Messkarten) erfasst und gespeichert. Die Erfassung der Klimawerte der Versuchskammern erfolgt mit dem zu den Messfühlern² gehörenden Programm³.

4.4.3.1 Die Erfassung der Gewichtswerte

Da sich herausstellte, dass die Gewichtsmessung sehr erschütterungsempfindlich ist und insbesondere die auf einer nahe verlaufenden Straße vorbeifahrenden LKW Vibrationen erzeugen, die sich deutlich in den Messwerten niederschlagen, wurde ein automatisiertes Messsystem entwickelt, welches eine nächtliche Messung erlaubt. Die Messung wird von einem LabView-Programm gesteuert und findet jeweils in der Nacht, zwischen null und ca. zwei Uhr statt. Ein prinzipielles Ablaufdiagramm des Messvorgangs ist in Bild 4.6 dargestellt.

Nachdem die Ventilatoren abgeschaltet sind, wird nach einer Wartezeit von 15 min

² rotronic HygroClip-HK25

³ HW4-E

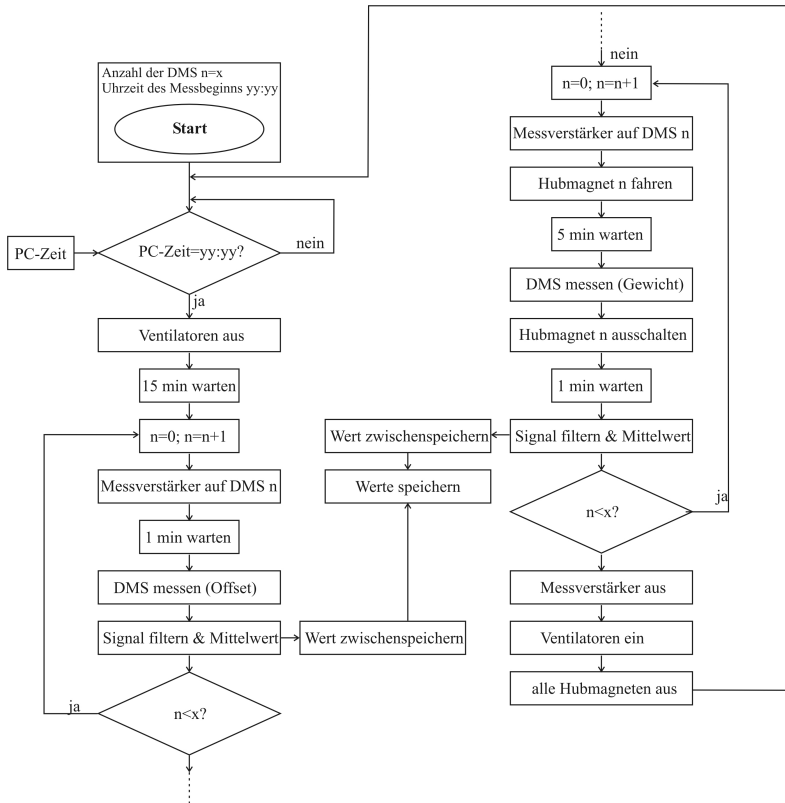


Bild 4.6: Ablaufdiagramm der elektronischen Messdatenerfassung.

zuerst der Tarawert sämtlicher angeschlossener Prüfkörper nacheinander erfasst. Dann wird jeder Probekörper nacheinander angesteuert, der Hubmagnet eingeschaltet und dadurch der Korb an die DMS-Waage gehängt, eine Zeit von 5 min gewartet, um den Korb auspendeln zu lassen, und dann die Messwerte über einen Zeitraum von 1 min erfasst. Diese Werte werden tiefpassgefiltert (Grenzfrequenz 10 Hz) und der Mittelwert zusammen mit der aktuellen Uhrzeit, dem aktuellen Datum und dem anfangs erfassten Tarawert in einer txt-Datei zur späteren Auswertung gespeichert. Der Magnet wird wieder ausgeschaltet und die DMS-Waage da-

durch entlastet. Danach schaltet das Programm weiter zur nächsten DMS-Waage, bis alle angeschlossenen und eingestellten Probenkörper durchlaufen sind. Abschließend werden die Ventilatoren wieder eingeschaltet und das Programm wartet bis zur nächsten Messung.

4.4.4 Die Erfassung der einzelnen Strecken, über die Wasser eindringt

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, kann Wasser auf verschiedenen Wegen in das Innere des Komposit-Hohlisolators gelangen:

- Deckel – Armatur
- Armatur – Rohr
- GFK-Rohr
- Kabeldurchführung (nur bei diesen Untersuchungen)

Um bei der Untersuchung die mit dem Trockenmittel gemessene Gesamtwassermenge (siehe auch Kapitel 4.4.2) auf diese verschiedenen Eindringwege aufzuteilen, ist es notwendig, verschiedene Arten von Prüfkörpern zu untersuchen.

Zum einen wird die Dichtstrecke zwischen Deckel und Armatur einzeln untersucht. Dazu wird eine Armatur, anstatt auf ein Rohr aufgebracht zu werden, an der Unterseite gasdicht verschweißt. Die Oberseite wird wie bei den Hohlisolatoren mit einem O-Ring und einem Deckel verschlossen. Um nur den Einfluss dieser Dichtung zu messen, wird ein Deckel ohne Kabeldurchführung verwendet. In Kapitel 5.3 sind der genaue Versuchsablauf und die daraus gewonnenen Ergebnisse dargestellt.

Des Weiteren wird, um die Wassermenge zu bestimmen, die durch die Kabeldurchführung eindringt, diese gesondert untersucht. Sie wird dazu statt auf den Deckel auf eine Aluminiumröhre geschraubt. Das Dichtsystem gegenüber der Röhre ist dabei das gleiche wie gegenüber dem Deckel. Die genaue Beschreibung dieses Versuches und seine Ergebnisse sind in Kapitel 5.4 beschrieben.

Um die eindringende Feuchtigkeit der Permeation durch das Rohr oder den Kontaktbereich Armatur – Rohr zuordnen zu können, ist es notwendig, zwei verschiedenen lange Probekörper zu untersuchen, bei denen alle anderen Merkmale gleich sind. Eine einzelne Untersuchung der Strecken ist nicht möglich. Das reine GFK-Rohr kann ohne einen angebrachten Flansch nicht dicht verschlossen werden, und der Kontaktbereich Rohr – Armatur kann nicht ohne das GFK-Rohr nachgebildet werden. Aus diesem Grund werden zusätzlich zu den »langen« Probekörpern mit einer freiliegenden GFK-Länge von $l_1 = 1\,495\text{ mm}$ auch »kurze« Probekörper mit einer halb so großen freiliegenden GFK-Länge von $l_2 = 747\text{ mm}$ untersucht.

Aus der beschriebenen Konstellation ergibt sich folgende Aufteilung:

- Der Einzelversuch der Kabeldurchführung liefert die Wassermenge m_K , die durch die Kabeldurchführung eindringt.
- Die Einzeluntersuchung der O-Ring-Dichtung liefert die Wassermenge m_D , die über die Deckeldichtung eindringt.
- Die Untersuchung eines »langen« Prüfkörpers liefert die Summe aus der Wassermenge durch die Kabeldurchführung, die Deckeldichtung, eine komplette GFK-Strecke und die Armatur – Rohr-Verbindung $m_1 = m_K + m_D + m_{\text{GFK}} + m_{\text{AR}}$.
- Die Untersuchung eines »kurzen« Probekörpers liefert die Summe aus der Wassermenge durch die Kabeldurchführung, die Deckeldichtung, die halbe GFK-Strecke (im Vergleich zur GFK-Strecke des »langen« Rohres) und die Armatur – Rohr-Verbindung $m_2 = m_K + m_D + \frac{1}{2} \cdot m_{\text{GFK}} + m_{\text{AR}}$.

Es ergibt sich also ein Gleichungssystem mit 4 Messergebnissen, das sich dann lösen lässt. Somit sind Rückschlüsse auf den Beitrag aller Strecken auf die Gesamtmenge des eingedrungenen Wassers möglich.

4.5 Mechanische Belastung

Die mechanischen Belastungen und Untersuchungen wurden, wie in Kapitel 1.2 beschrieben, von der MPA Darmstadt vorgenommen.

Genauere Informationen zu den rein mechanischen Untersuchungen und den Prüfeinrichtungen sind bei [HAU 09] zu finden. Hier soll nur ein kurzer Überblick über die für diese Arbeit relevanten Bereiche gegeben werden.

Dazu ist es erst einmal wichtig, die Möglichkeiten der mechanischen Belastung für Komposit-Hohlisolatoren zu betrachten. Auf einen Komposit-Hohlisolator wirken im Zuge seiner Lebensdauer vielfältige Kräfte ein. Einige davon sind dauernd vorhanden, andere treten nur kurzzeitig oder selten auf. Zu den möglichen Belastungen zählen z. B.

- Transport- und Installationsbelastung – einmalig in der Gesamtlebensdauer
- statische Grundlast durch Seilzug und Eigengewicht, überlagert durch z.B. Temperatureinflüsse – ständig
- oszillierende Windlast durch direkten Windangriff und Seilzug durch Wind – in unregelmäßigen Abständen
- im Falle von Leistungs-Schalter-Isolatoren starke mechanische Erschütterung durch Schalten – 1 bis 50 mal im Jahr
- stochastische dynamische Last durch Kurzschlussstromkräfte – 0 bis 2 mal im Jahr
- stochastische dynamische Last durch Erdbeben - 0 bis 2 mal in der Gesamtlebensdauer

Da das genaue Belastungsprofil jedoch nicht bekannt ist, kann es auch nicht in Prüfungen simuliert werden. Zur Prüfung der Komposit-Hohlisolatoren muss also eine andere Art der mechanischen Belastung gewählt werden.

In der Norm [IEC 61462] für Verbundhohlisolatoren werden einige Begriffe festgelegt, die den komplexen Vorgang der mechanischen Schädigung von Komposit-Hohlisolatoren handhabbar machen sollen (siehe auch Bild 4.7). Dies ist unter anderem die sogenannte SML, die Specified Mechanical Load oder auch »deklarierte mechanische Last«. Wird das Rohr mit dieser Last beaufschlagt, befindet

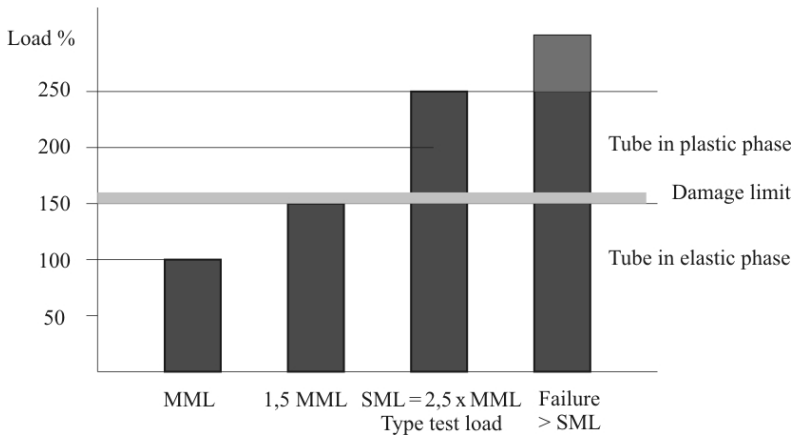


Bild 4.7: Beziehung zwischen den Biegelasten nach [IEC 61462].

es sich in einer irreversiblen plastischen Phase, ist also schon dauerhaft beschädigt. Dieser Wert liegt jedoch unter dem Bruchwert. Der zweite wichtige Wert ist die sogenannte MML, die Maximum Mechanical Load oder auch »mechanische Höchstlast«. Bei einer Belastung mit dieser MML befindet sich das Rohr in der reversiblen elastischen Phase, kann also wieder in einen Zustand sehr ähnlich dem Ausgangszustand zurückkehren. Die MML beschreibt auch die höchste Last, die im Einsatz auf den Hohlisolator wirken sollte. Zwischen diesen beiden Werten gibt es einen Sicherheitsfaktor, so dass der Zusammenhang $SML = 2,5 \cdot MML$ lautet. Zwischen diesen beiden Werten liegt bei $1,5 \cdot MML$ die sogenannte Schadensgrenze, bei welcher das Rohr gerade noch in der reversiblen elastischen Phase ist. Bis zu diesem Wert sollen mechanische Lasten wirken können, ohne Mikroschäden zu verursachen. Diese Kennwerte werden vom Hersteller für seine Rohre angegeben und in der Typprüfung geprüft.

Für die Typprüfung nach [IEC 61462] wird die Biegelast senkrecht zur Isolatorachse am Isolatorkopf aufgebracht. Als erstes wird innerhalb von 30 s die Last am Komposit-Hohlisolator von Null auf die MML erhöht und dann für 30 s aufrecht erhalten. Die Auslenkung des Isolatorkopfes wird während dieser Belastung ebenso wie im Zeitraum von 3 min bis 5 min nach Entfernung der Last gemessen. Bei

dieser Prüfung darf das Rohr weder brechen noch ausreißen und keine sichtbaren Beschädigungen an der Endarmatur aufweisen. Die gemessenen Auslenkungen dürfen die Herstellerspezifikationen nicht überschreiten. Als Zweites wird die Last auf 1,5 MML erhöht und für 60 s gehalten. Dabei und danach werden wiederum die Auslenkungen gemessen. Auch bei dieser Prüfung darf das Rohr weder brechen noch ausreißen und auch die Endarmatur nicht beschädigt werden. Außerdem darf die Auslenkung nach dem Entfernen der Last maximal $\pm 5\%$ von der maximalen Auslenkung betragen. Zum Schluss wird eine Last von 2,5 MML für 60 s angelegt. Dabei darf das Rohr weder brechen noch ausreißen und es darf keine sichtbare Beschädigung aufweisen.

Somit besteht eine Typprüfung aus einer dreimaligen statischen Belastung des Prüflings. Die Lasten im Einsatz der Hohlisolatoren wiederholen sich jedoch teilweise wesentlich häufiger, wenn auch mit geringerer Last. Um für die vorliegenden Untersuchungen möglichst eher anwendungsbedingte Belastungen zu simulieren, wird größtenteils eine mechanische Belastung abweichend von der Typprüfung der Norm [IEC 61462] gewählt und im Folgenden beschrieben.

Um die Prüfkörper mechanisch zu belasten, werden diese in waagerechter Lage an einem Prüfgestell befestigt. Dieses wird mit einer servohydraulischen Prüfmaschine verbunden, so dass eine Biege-Wechselbeanspruchung auf den Prüfling erfolgen kann. Das Bild 4.8 zeigt eine Zeichnung dieses Aufbaus und Bild A.7 ein Foto eines eingebauten Prüflings. Die mechanische Belastung wird »bi-polar«, also um den Nullpunkt bzw. Ruhepunkt des Prüflings herum, aufgebracht. Die Prüffrequenz liegt bei 0,5 Hz, um eine Eigenerwärmung des Prüflings zu vermeiden. Als Belastung wurde die MML gewählt. Diese wurde 5 000 mal aufgebracht. Für eine erhöhte mechanische Belastung wurde $500 \cdot 1,35$ MML gewählt. Die MML ist die Belastung, die sich am Fusspunkt des Prüflings ergibt und muss in die Kraft, die dafür am Kopf aufgebracht werden muss, umgerechnet werden. Für die mechanisch belasteten dickwandigen Komposit-Hohlisolatoren ergeben sich aus diesen Vorgaben die Werte nach Tabelle 4.1.

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen werden vergleichsweise auch statische Lasten, wie in der Typprüfung für Verbundisolatoren nach [IEC 61462], aufge-

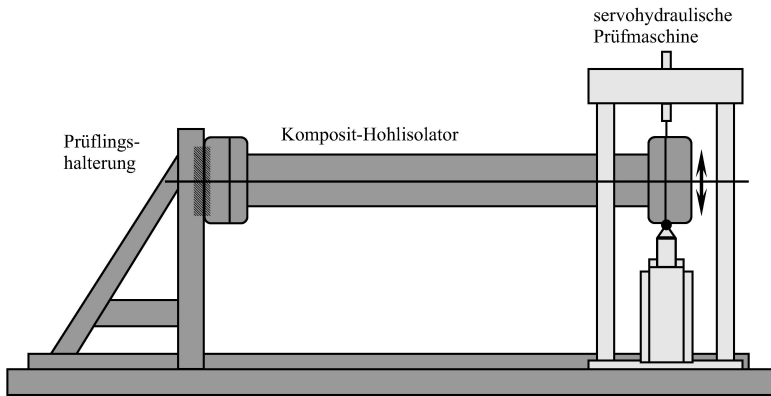


Bild 4.8: Komposit-Hohlisolator mit servohydraulischer Prüfmaschine.

Tabelle 4.1: Werte für die mechanische Belastung der Komposit-Hohlisolatoren.

	lang	kurz
1,0 MML	4,0 kN	7,7 kN
1,35 MML	5,4 kN	10,4 kN
1,5 MML	6,0 kN	11,6 kN
2,0 MML	8,0 kN	15,4 kN
2,2 MML	8,8 kN	16,9 kN
2,5 MML	10,0 kN	19,3 kN

bracht. Anstatt feste Belastungswerte zu wählen, wird als Ziel dieser statischen Belastung jedoch die Verformung festgelegt. Diese sollte nach der Belastung möglichst den Maximalwert von 5 % erreichen, den die Norm als Grenzwert der reversiblen elastischen Phase sieht. Hierfür werden bei den untersuchten Probekörpern Lasten zwischen 2,0 MML und 2,2 MML benötigt.

Eine weitere Möglichkeit der mechanischen Belastung bestünde in einer zyklischen Belastung, die nicht um den Nullpunkt herum aufgebracht wird. Dazu wird das Rohr in eine Richtung vorbelastet und dann um diesen Punkt herum eine zyklische Last aufgebracht, also sozusagen eine Grundlast mit überlagerter Last, die zu Schwankungen des Spitzenwertes führt. Dabei wird der Nullpunkt des Rohres

nicht überschritten. Solcherart vorbelastete Prüfkörper werden jedoch in den vorliegenden Untersuchungen nicht betrachtet.

4.5.1 Untersuchung der Helium-Leckrate

Nach den mechanischen Belastungen werden die Prüfkörper mit einer Heliumlecksuche auf Undichtigkeiten hin untersucht. Dazu wird der Komposit-Hohlisolator in ein größeres Rohr eingebracht, welches dann evakuiert und mit Helium (1013 mbar) gefüllt wird. Währenddessen wird das Innere des Komposit-Hohlisolators ständig durch einen Helium-Lecksucher evakuiert. Dieser detektiert das in den Prüfling eindringende Helium und misst die Leckrate. Ein Foto dieses Aufbaus zeigt Bild A.8. Mit der gleichen Methode werden auch alle neuwertigen Komposit-Hohlisolatoren vor der Wasserdampfdichtigkeitsuntersuchung auf Leckagen untersucht. Neuwertige Rohre liefern dabei Werte im Bereich der Messgenauigkeit von kleiner 10^{-6} mbar l/s. Die Werte mechanisch vorgeschädigter Rohre werden in Kapitel 6.4 im Einzelnen dargestellt.

5 Untersuchungen an Materialproben

Neben den Untersuchungen am Gesamtsystem des Komposit-hohlisolators, welche im Kapitel 6 dargestellt werden, werden noch weitere Untersuchungen durchgeführt. Diese beziehen sich auf GFK-Materialproben, wie sie im Isolatorenbau zum Einsatz kommen. Hierbei wird sowohl Stabmaterial, welches für Komposit-Langstabisolatoren eingesetzt wird, als auch Rohrmaterial, das bei Komposit-Hohlisolatoren Verwendung findet, betrachtet. An ihnen werden grundsätzliche Abhängigkeiten überprüft. Des Weiteren werden einige der im Kapitel 3.1 aufgezeigten Wege, über welche Wasser in den Komposit-Hohlisolator eindringen kann, einzeln untersucht. Dies soll eine Zuteilung der am Gesamtsystem bestimmten Permeationsmenge auf die verschiedenen Strecken, über die Wasser eindringt, ermöglichen.

5.1 Untersuchungen an Stäben

GFK-Stäbe, wie sie zur Herstellung von Komposit-Langstabisolatoren verwendet werden, werden in Wasserlagerungsversuchen bei verschiedenen Temperaturen untersucht (vergleiche Kapitel 4.2).

Die Stäbe werden mittels Pultrusion (vergleiche Kapitel 2.2.3.1) gefertigt und bestehen aus ECR-Glas und einem heißgehärteten Bisphenol-A-Harz mit Carbon-säureanhydrid-Härter. Der Glasanteil liegt bei ca. 65 Gew.-%. Sie werden für die Versuche in 25 cm lange Stücke gesägt und haben einen Durchmesser von 24 mm. Das Lagerungsverfahren und die Messroutinen sind in Kapitel 4.2 beschrieben.

Die Stäbe haben ein Anfangsgewicht von $212,5 \pm 2$ g. Ihre Gewichtszunahme wird mit einer Feinwaage¹ mit einer Anzeigeauflösung von 0,1 mg bestimmt. Die Standardabweichung der Waage liegt bei 0,15 mg und die Linearität über den gesam-

¹ Shimadzu AW320

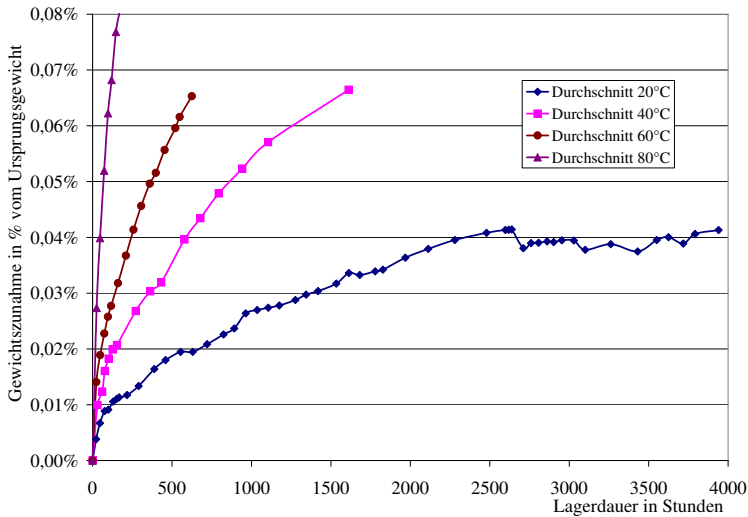


Bild 5.1: Die relative Gewichts Zunahme der reinen GFK-Stäbe als Durchschnittswerte aller gemessenen Stäbe.

ten Messbereich von 320 g bei $\pm 0,3$ mg. Da die absolute Gewichts Zunahme sehr gering ist, spielt die Linearität für die Erfassung der Messwerte nur eine untergeordnete Rolle. Der Temperatureinfluss auf die Genauigkeit der Waage ist auf Grund des gleichbleibenden Klimas am Standort der Waage ebenfalls zu vernachlässigen. Die Standardabweichung ist somit der bestimmende Einfluss für die Beurteilung der Messung. Eine festgestellte Masseänderung von z. B. 0,001 % liegt mit ca. 2 mg noch weit über der Hauptquelle der Messunsicherheit mit 0,15 mg. Die Ergebnisse der Lagerversuche für GFK-Stäbe bei verschiedenen Temperaturen sind in Bild 5.1 als Diagramm der relativen Massezunahme über der Zeit aufgetragen.

Es zeigt sich, dass die Wasseraufnahme mit steigender Temperatur schneller vonstatten geht. Benötigen die Stäbe bei einer Wassertemperatur von 20 °C noch ca. 2350 Stunden, um einen Gewichtsanstieg von 0,04 % zu erreichen, so sind dies bei 40 °C nur noch ca. 575 h, bei 60 °C ca. 250 h und bei 80 °C ca. 47 h. Am Ver-

lauf der Kurven kann man aber erkennen, dass hier keine rein Ficksche Diffusion vorliegt, da nicht alle Kurven auf den gleichen Sättigungswert zulaufen, wie dies bei einer rein Fickschen Diffusion, wenn sich nur die Temperatur, nicht jedoch die relative Feuchte ändert, der Fall wäre. Deswegen darf hier nicht ohne weiteres auf einen bestimmten Beschleunigungskoeffizienten geschlossen werden. Im vorliegenden Fall wird sowohl der Transportmechanismus der Diffusion beschleunigt, als auch das nicht Ficksche Verhalten der Diffusion aufgrund einer beschleunigten Wechselwirkung des Wassers mit dem Polymer. Die Diffusion steigt dadurch im untersuchten Temperaturbereich um mehr als eine Größenordnung an.

Kleinere Schwankungen in den Kurven, wie sie z. B. bei 40 °C im Bereich von ca. 500 Stunden Lagerdauer zu sehen sind, beruhen auf Temperaturschwankungen des Wassers. Trotz der in Kapitel 4.2 beschriebenen geregelten Erwärmung des Wassers traten kurzzeitige Temperaturschwankungen von einigen Grad Celsius auf, die sich sofort sichtbar in den aufgenommenen Messwerten niederschlugen. Bei leicht erhöhter Temperatur wird sofort mehr Wasser aufgenommen, und bei leicht geringerer Temperatur weniger als erwartet. Schon nach wenigen Stunden schlägt sich dies in den gemessenen Gewichtswerten nieder. Auch dies zeigt die starke Temperaturabhängigkeit der Reaktion.

5.2 Untersuchungen an Rohrabschnitten

Es werden Rohrabschnitte verschiedener vorhandener Rohrarten in einer Lagerungseinheit nach Kapitel 4.3 bei zwei verschiedenen Temperaturen gelagert. Die Wägung erfolgt mit einer Analysewaage² die in den genutzten beiden Wägebereichen eine Standardabweichung von $\pm 0,01$ g aufweist. Die Ablesegenauigkeit liegt je nach Wägebereich bei 0,01 bzw. 0,02 g und die Linearitätsabweichung bei $\pm 0,02$ g. Die Linearität und der Temperatureinfluss sind auf Grund der geringen absoluten Gewichtsänderung und auf Grund der konstanten Temperatur am Messort vernachlässigbar. Die Rohrabschnitte wiegen je nach Material und Größe ca. $1\,040 \pm 60$ g. Eine festgestellte Masseänderung von z. B. 0,005 % liegt mit ca.

2 Sartorius MC1 Laboratory LC2200P

Tabelle 5.1: Rohrarten der untersuchten Abschnitte.

Art	Material Glasgehalt	Herstellverfahren Wickelart	Außen- \varnothing in mm	Innen- \varnothing in mm	Wickel- winkel
C	Cevolit A2213 75 – 80 Gew.-%	vakuuminprägniert parallelgewickelt	166	154	$\alpha = 86^\circ$
D	unbekannt 70 – 75 Gew.-%	unbekannt parallelgewickelt	172	158	$\alpha = 87^\circ$
E	unbekannt 75 – 80 Gew.-%	nass fadengewickelt kreuzgewickelt Dampfschutzfolie	170	158	$\alpha = 30^\circ$ $\beta = 120^\circ$
F	Cevolit A2315 70 – 75 Gew.-%	nass fadengewickelt kreuzgewickelt	167	154	$\alpha = 57^\circ$ $\beta = 66^\circ$
G H	Cevolit A2315 70 – 75 Gew.-%	nass fadengewickelt kreuzgewickelt schon wassergelagert	166	152	$\alpha = 57^\circ$ $\beta = 66^\circ$

0,05 g noch über der Hauptquelle der Messunsicherheit mit 0,02 mg.

Die untersuchten Rohrarten sind in Tabelle 5.1 aufgeführt. Die Art E ist mit einer Schutzfolie gegen Wasserdampfpermeation, einer sogenannten Dampfbremse, überwickelt. Die Arten G und H entsprechen den untersuchten Komposit-Hohlisolatoren aus Kapitel 6, jedoch sind sie schon einmal einer Feuchte- und Temperaturbelastung (80 °C und 95 % rel. Feuchte) ausgesetzt gewesen. An ihnen lässt sich erkennen, wie das Material auf eine erneute Belastung reagiert. Die Art F, die den Arten G und H entspricht, ist noch nicht vorbelastet.

Von jeder Art wird lediglich jeweils 1 Prüfkörper untersucht. Es werden alle Arten bei 75 °C und die Arten C, G und F bei 20 °C untersucht. Eine Untersuchung bei 80 °C ist technisch nicht möglich.

Die gemessenen Gewichtsanstiege können entweder als absolute oder relative Gewichtszunahme über der Zeit dargestellt werden, oder man geht hierbei auf die Geometrie der Rohrabschnitte ein. Es kann die Gewichtszunahme auch auf die dem Wasser ausgesetzte Oberfläche oder das dem Wasser zur Verfügung stehende Volumen bezogen werden. Es zeigt sich jedoch, dass sich die entsprechenden

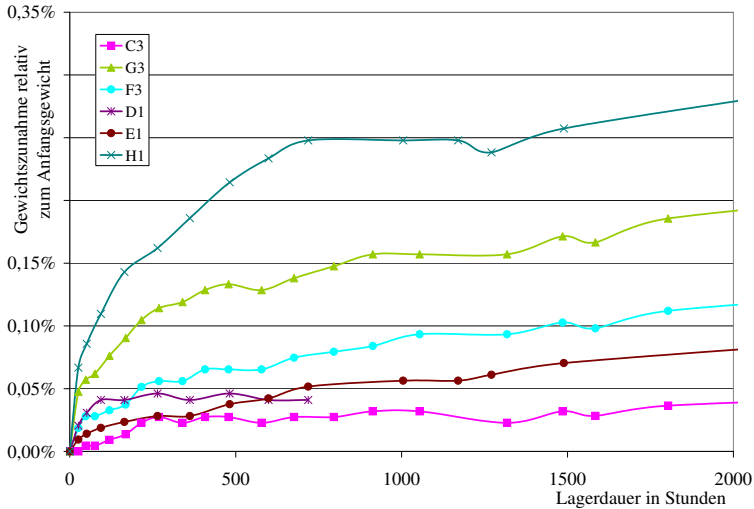


Bild 5.2: Die relative Gewichtszunahme von GFK-Rohrabschnitten bei 75 °C.

Kurven in ihrem Verhältniss zueinander dadurch nicht nennenswert ändern. Aus diesem Grund werden nur die Diagramme der relativen Gewichtszunahme bezogen auf das anfängliche Trockengewicht angegeben. Die Verläufe der Prüfkörper bei einer Lagerung von 75 °C sind in Bild 5.2 und die der Prüfkörper C, G und F im Vergleich von 20 °C und 75 °C in Bild 5.3 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass die Wasseraufnahme in der Versuchszeit von 2000 h keinen stabilen Endwert erreicht, sondern sich an den ersten Bereich einer Quasisättigung jeweils noch eine weitere leichte Steigung anschließt. Hier werden durch die Wechselwirkungen von Wasser und Polymer Kleinsträume zwischen den Molekülen geschaffen, in denen mehr Wasser aufgenommen werden kann [KUM 05 I]. Es ist aber auch zu sehen, dass die Kurven wesentlich stärker einer Sättigung entgegenlaufen, als dies bei den untersuchten Stäben der Fall ist. Die Diffusion innerhalb der Stäbe und Rohre unterscheidet sich demnach. Dies kann z. B. auf die unterschiedliche Oberfläche oder auch auf die Ausrichtung der Glasfasern zurück-

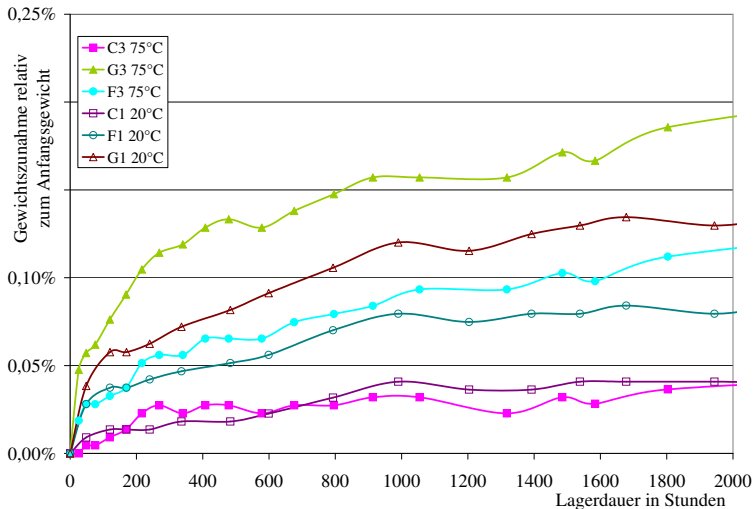


Bild 5.3: Die relative Gewichtszunahme von GFK-Rohrabschnitten bei 75 °C und 20 °C im Vergleich.

zuführen sein. Auch die Tatsache, dass bei den Rohrabschnitten eine Desorption an der Innenseite in die »Umgebungsluft« möglich ist (siehe Bild 4.2) und sich hier eine durchschnittliche relative Luftfeuchte von lediglich 50 % einstellt, führt zu grundsätzlich anderen Verläufen. Es stellt sich bei den Rohren ein Konzentrationsverlauf im Material zwischen den umgebenden 100 % und der inneren Luft ein. Somit spiegeln die aufgenommen Verläufe auch die Vorgänge an den Hohlisolatoren besser wider.

Wie Bild 5.2 an den Verläufen der Prüflinge F, G und H zeigt, nehmen Rohrabschnitte, die ein zweites Mal der Belastung durch Feuchtigkeit ausgesetzt sind (G und H), mehr Wasser auf, als dies bei gleichartigen unbelasteten Rohren (F) der Fall ist. Dieses Verhalten wird auch von [ALV 07] dokumentiert und unter anderem durch das Aufbrechen der Polymerketten durch die vorherige Belastung erklärt, so dass mehr Platz zur Verfügung steht, um Wassermoleküle aufzunehmen. Des Weiteren ist am Verlauf des Prüflings E zu erkennen, dass eine zusätzlich auf-

gewickelte Schutzfolie die Wasseraufnahme verlangsamt. Die Kurve verläuft im Anfangsbereich wesentlich flacher, als dies bei den anderen Verläufen der Fall ist. Die Folie scheint jedoch keinen Einfluss auf die Gesamtwassermenge zu haben, da die Kurve im Endbereich der Untersuchung nahezu parallel zu den anderen Kurven verläuft. Dies deutet auch darauf hin, dass die reine Verlangsamung der Wasseraufnahme nicht zwingend die Diffusion als Ganzes beeinflusst.

Die geringste Wasseraufnahme weist das vakuumimprägnierte Rohr C auf. Dies lässt sich unter anderem mit dem wesentlich geringeren Anteil von Poren oder Lufteinschlüssen erklären (siehe auch Kapitel 2.2.3.2), wodurch sich auch weniger Wasser im Material ablagern kann. Außerdem weist dieses Rohr einen höheren Glasgehalt auf. Da die Glasfasern kein Wasser aufnehmen, sondern nur das Harz, steht hier 5 % bis 10 % weniger Material zur Aufnahme von Wasser zur Verfügung. Für die Rohrart D lässt sich sagen, dass der Verlauf nahezu einer Fickschen Diffusion entspricht. Die geringe absolute Wasseraufnahme trotz des geringen Glasgehalts lässt auf ein sehr fehlerfreies Rohr ohne Lufteinschlüsse schließen. Es steht zu vermuten, dass es, wie Rohr C, im Vakuumverguss hergestellt wurde.

Die Kurvenverläufe für die Wasseraufnahme bei 20 °C in Bild 5.3 bestätigen die Erkenntnisse aus der 75 °C-Messung. Auch hier nimmt das Rohr, welches schon einmal einer Feuchte- und Temperaturbelastung ausgesetzt (G) war, mehr Wasser auf als ein vergleichbares neuwertiges Rohr (F). Das vakuumimprägnierte Rohr nimmt ebenfalls am wenigsten Wasser auf.

Im Vergleich der Wasseraufnahmen bei einer Wassertemperatur von 75 °C und 20 °C zeigt sich, dass die Verläufe grundsätzlich ähnlich sind und sich nur gering beschleunigen. Insbesondere im Vergleich mit der großen Beschleunigung bei den untersuchten Stäben (Kapitel 5.1) ist diese geringe Beschleunigung überraschend. Dies ist jedoch unter anderem auch darauf zurück zu führen, dass im Fall der Rohre eine Desorption an der Innenseite vorliegt. Es stellt sich also eine niedrigere Konzentration ein, als dies bei den komplett von Wasser umgebenen Stäben der Fall ist. Somit besteht bei den Stäben auch eine größere Wechselwirkung mit dem Wasser und es werden mehr zusätzliche Räume für die Einlagerung von Wasser geschaffen.

Die Versuche, sowohl an Stäben als auch an Rohrabschnitten, zeigen, dass die Wasserlagerung von Materialproben nicht zielführend ist, um Aussagen über die Wasserdampfdichtigkeit von Komposit-Hohlisolatoren zu gewinnen. Das Hauptproblem stellt dabei unter anderem die Wasserlagerung dar, da durch das umgebende Wasser Material aus den Proben gelöst wird und sich so das Referenzgewicht der Proben und auch die Materialzusammensetzung ständig ändern. Dies bedingt auch, dass sich aus der beobachteten Beschleunigung der Wasseraufnahme kein Beschleunigungsfaktor berechnen lässt. Es ist somit unumgänglich, Lagerungen in feuchter Umgebungsluft anstatt in Wasser vorzunehmen und dabei darauf zu achten, dass ein gerichteter Permeationsprozess ermöglicht wird, um Aussagen über die in Komposit-Hohlisolatoren eindringenden Wassermengen treffen zu können. Dies wird mit der Lagerung von Komposit-Hohlisolatoren realer Baugröße (siehe auch Kapitel 6) in feuchter Umgebungsluft erreicht.

5.3 Das Dichtsystem des Deckels

Der Deckel der Komposit-Hohlisolatoren wird gegen die Armatur mittels eines O-Rings gedichtet (siehe auch Kapitel 2.4 und 3.1). Um seinen Beitrag zur Gesamtdurchlässigkeit zu ermitteln, werden Armaturen, wie sie auch an den untersuchten Komposit-Hohlisolatoren in Verwendung sind, einseitig gasdicht mit einer Aluminiumplatte verschweißt. Der Flansch wird dann genauso wie die Isolatoren mit Trockenmittelbeuteln befüllt und mit einem O-Ring und einem Deckel verschlossen. Ein Foto ist in Bild 5.4 zu sehen.

Der Deckel weist keine Kabeldurchführung wie die auf den Probenkörpern befindlichen Deckel auf, da diese einzeln untersucht werden (siehe Kapitel 5.4).

Die verschlossenen Flansche werden in den Versuchskammern (siehe Kapitel 4.4.1) auf die darin befindlichen Prüflinge gelegt, so dass sich der O-Ring in etwa auf der gleichen Höhe in der Kammer (bei ca. 80 °C und 95 % r. F.) befindet wie die O-Ringe der Prüflinge.

Eine Armatur wird ein zweites Mal untersucht, um zu bestimmen, ob Flansche und Deckel, die schon einmal in Verwendung waren, durch eventuelle Verschmut-

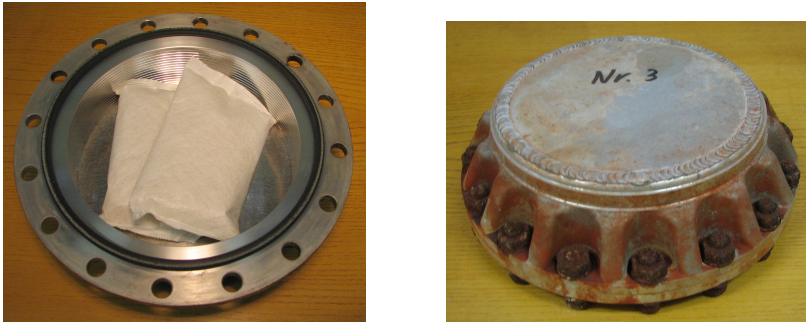


Bild 5.4: Eine verschweißte, mit Trockenmittelbeuteln befüllte Armatur. Links offen, rechts verschlossen im Zustand nach einer Lagerung.

Tabelle 5.2: Durchlässigkeit der O-Ring-Dichtung zwischen Armatur und Deckel.

Nr.	Zustand	Lagerdauer in Stunden	Gewichtsanstieg des Trockenmittels	Kommentare
1	gebraucht	3 143	3 g	Öffnen dauerte länger
2	neuwertig	3 143	4 g	
3	neuwertig	3 143	0,6 g	
4	neuwertig	3 143	0,5 g	

zungen veränderte Ergebnisse zeigen. Es wird jedoch, wie bei den untersuchten Gesamtsystemen auch, immer ein neuer O-Ring verwendet.

Die Feuchtigkeitseinwanderung wird über den Gewichtsanstieg des eingebrachten Trockenmittels gemessen. Da die Armatur nicht genügend Platz bietet, um eine Messmimik zu installieren, werden die Trockenbeutel nur vor dem Einbringen und nach der Entnahme gewogen. Das Verschließen und Öffnen der Deckel und der Wägevorgang werden dabei möglichst schnell vorgenommen, um eine Beeinflussung der Messung durch die Aufnahme von Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft zu minimieren. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Die Ergebnisse für Flansch Nr. 2 legen nahe, dass die Dauer der Öffnung, also zwischen dem Luftziehen beim Anlösen der Schrauben und dem Wiegen, einen nennenswerten Einfluss auf die Messergebnisse haben kann. Beim Befüllen der Flan-

sche werden deshalb Armatur, Deckel und benötigte Schrauben einzeln gewogen und in der Summe mit dem Gewicht der Trockenmittelbeutel mit dem Gewicht der gefüllten und verschlossenen Flansche verglichen. Hierbei sind keine Unterschiede feststellbar. Die Summe entspricht dem Ergebnis der Gesamtmessung. Dabei ist jedoch zu beachten, dass auf der verwendeten Waage nur eine Differenz von 0,1 g feststellbar ist, da das Gesamtgewicht inkl. Metall sehr hoch ist.

Eine Kontrollmessung über einen längeren Zeitraum zeigt, dass die Feuchtigkeitsaufnahme des Trockenmittels aus der beim Befüllen und Öffnen der Flansche herrschenden Umgebungsluft bei durchschnittlich 0,05 g/min liegt. Bei einer Dauer zwischen Anfangsmessung und Einlagerung von unter 30 Sekunden sowie zwischen dem Luftziehen beim Öffnen und der Abschlussmessung von maximal 2,5 Minuten ergibt sich aus dieser Zeit eine durchschnittliche Feuchtigkeitsmenge von 0,15 g. Bei schnellerem Öffnen sind niedrigere Werte möglich.

Die aufgenommenen Werte liegen absolut jedoch lediglich bei 0,5 g bzw. 0,6 g für die neuwertigen Deckel und 3 g für den wiederverwendeten Deckel. Der Versuchsdeckel, bei dem das Öffnen der Schrauben auf Grund von Korrosionserscheinungen wesentlich länger dauerte, wies eine Zunahme von 4 g auf. Die gemessenen Werte für neuwertige Flansche sind zu fast $\frac{1}{3}$ durch Außeneinflüsse bedingt, wenn man vom schnellstmöglichen Vorgehen ausgeht. Es dringt somit maximal 0,45 g Feuchtigkeit in einem Zeitraum von 3 143 Stunden über den O-Ring ein. Dies wären 0,14 mg/h.

Der wiederverwendete Flansch weist eine wesentlich größere Gewichtszunahme auf. Obwohl der Öffnungsvorgang hier ca. 3 Minuten dauerte, ist diese nicht nur mit der Aufnahme von Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft zu erklären. Auch wenn mit dem bloßen Auge keine Veränderungen an der Dichtfläche des Flansches und der Nut des Deckels zu erkennen sind, scheinen Verschmutzungen oder Fehler vorzuliegen, die sich durch eine Reinigung mit Alkohohl nicht beseitigen lassen und somit das Dichtverhalten des O-Rings verschlechtern. Für einen wiederverwendeten Deckel ist somit von einer gesteigerten Feuchtigkeitsmenge von 3 g abzüglich 0,175 g für die Zeit des Verschließens und Öffnens pro 3 143 Stunden auszugehen. Dies wären 0,9 mg/h.

Es ist davon auszugehen, dass insbesondere die Veränderungen der Dichtfläche bei wiederverwendeten Deckeln, aber auch Fertigungsunterschiede der neuwertigen Deckel zu einer Streuung der Ergebnisse führen. Die Werte können somit nur als Anhaltspunkte für die zu erwartenden Feuchtigkeitsmengen der unterschiedlichen Deckel gelten. Auf Grund der Veränderung des Deckels durch die Verwendung ist es nicht möglich, für jeden Deckel die genaue Feuchtigkeitseinwanderung vor oder nach dem Einsatz im Gesamtsystem zu bestimmen. Es wird daher bei abschließenden Überlegungen pauschal von einer Rate von 0,9 mg/h unter den vorliegenden Versuchsbedingungen ausgegangen.

5.4 Die Kabeldurchführung

Für die Versorgung des Hubmagneten, welcher die Ent- und Belastung des Wägesystems ermöglicht, und die Versorgung und das Auslesen der DMS-Waage sind mehrere Kabel nötig, welche in das Innere der Kammer geführt werden müssen. Als beste Lösung stellte sich nach Vorversuchen eine selbstgefertigte und vergossene Messleitungsdurchführung heraus (siehe auch Kapitel 4.4.2.1). Diese wird mittels eines Aluminiumdichtrings und eines Feingewindes im Deckel verschraubt. Sie bildet eine zusätzliche, im normalen Anwendungsfall nicht vorhandene, Permeationsstrecke und wird gesondert untersucht (siehe auch 3.1).

Zur Untersuchung werden die Messdurchführungen anstatt auf Deckel auf Aluminiumröhren geschraubt, die vorher mit Trockenmittel befüllt werden. Da die Durchführungen regelmäßig gewogen werden sollen, ist es nicht möglich, sie in den gleichen Prüfkammern zu lagern wie die Komposit-Hohlisolatoren, da sich diese nur mit großem Aufwand öffnen lassen. Die Röhren werden stattdessen in einem Exsikator, der einen ausreichend großen Wasservorrat enthält und in einem Wärmeofen steht, dem gleichen beschleunigenden Klima wie die Prüfkörper ausgesetzt (siehe Bild 5.5).

Es wird sowohl das erste Design mit ungefülltem EP, als auch das optimierte mit gefülltem EP untersucht. Zusätzlich wird bei einer Röhre die Dichtfläche unter dem Aluminiumdichtring so abgeschliffen, wie dies auch bei Deckeln, in die zum zweiten Mal eine Durchführung eingebracht wird, getan wird. Das Abschleifen ist



Bild 5.5: Eine Kabeldurchführung im Einzelmessaufbau und mehrere im Exsikator zur Ofenlagerung.

notwendig, um Oberflächenveränderungen durch die Lagerung abzutragen.

Durch den ausreichenden Wasservorrat im Exsikator unterhalb der Keramikscheibe, auf der die Durchführungen stehen, stellt sich im Exsikator ein Klima mit gesättigter Luft ein. Durch das Einbringen des Exsiktors in einen Wärmeofen wird die Temperatur von 80 °C erreicht.

Zu Beginn der Lagerung lässt sich durch die Wägung des Gesamtsystems, bestehend aus Aluminiumröhre-Trockenmittelfüllung-Durchführung, nur der Gewichtsanstieg durch die Wasseraufnahme der Vergussmasse der Durchführung erkennen. Ist diese jedoch gesättigt, zeigt der weitere Gewichtsanstieg die Gewichtszunahme des Trockenmittels an und ist ein Maß für die andauernde Permeation.

Die aufgenommenen Werte sind bei drei untersuchten Durchführungen gut reproduzierbar und in Bild 5.6 dargestellt. Gut erkennt man die starke Gewichtszunahme und eine langsame Sättigung. Nach ca. 4 400 h ist kein Gewichtsanstieg mehr feststellbar. Da nicht eindeutig zugeordnet werden kann, ob das Trockenmittel evtl. schon in Sättigung ist, werden die Röhren nach 4 800 h Lagerdauer geöffnet und das Trockenmittel schnellstmöglich separat gewogen. Es zeigt sich, dass das Trockenmittel lediglich eine Gewichtszunahme unter einem Gramm aufweist, obwohl

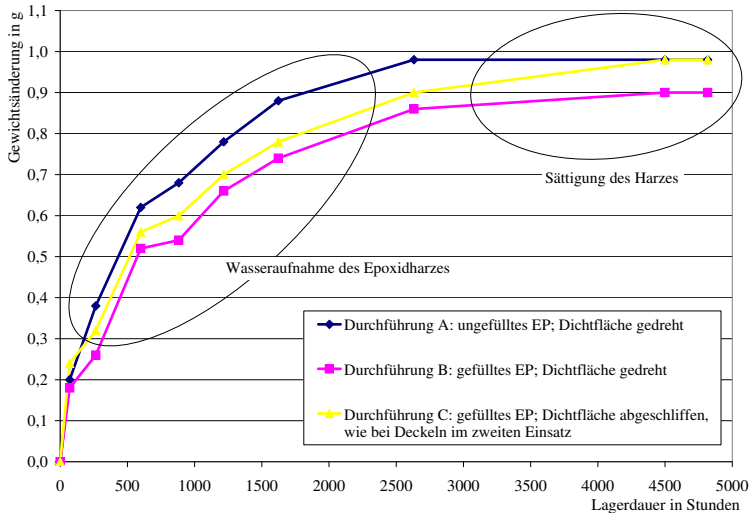


Bild 5.6: Der Gewichtsanstieg der Aluminiumröhren mit Durchführungen.

es ca. 2,5 g aufnehmen können sollte. Diese Sättigungsgrenze wird durch eine folgende Lagerung des Trockenmittels aus den Aluminiumröhren in feuchter Umgebungsluft verifiziert. Somit zeigt das Diagramm ausschließlich die Sättigung der EP-Vergussmasse.

Um trotzdem einen Rückschluss auf die Permeationsrate zu erlauben, wird der wahrscheinlichste Fall angenommen. Es gibt bei der Durchführung zwei Strecken, über die Feuchtigkeit in die abgedichteten Röhren oder Deckel gelangen kann. Dies ist einmal an der Dichtstelle des Aluminium-Dichtringes und des Weiteren durch das EP. Ein Eindringen entlang des Aluminium-Dichtrings wird über die gesamte Dauer stetig stattfinden. Da diese Dichttechnik jedoch auch für Vakuumanlagen genutzt wird, ist hier der wesentlich geringere Teil anzusetzen. Durch das EP muss das Wasser erst hindurchdiffundieren, so dass der konstante Endwert erst nach der Sättigung des EP erreicht ist. Nimmt man nun an, dass sämtliches Wasser, das nach Abschluss der Messungen im Trockenmittel gebunden ist, erst nach dem

Tabelle 5.3: Durchlässigkeit der Messkabel-Durchführungen.

Durchführung	Trockenmittel- gewichtszunahme	Dauer seit Feststellen der Sättigung	Permeationsmenge
A	371 mg	2 185 h	0,17 mg/h
B	44,9 mg	317,5 h	0,14 mg/h
C	60,5 mg	317,5 h	0,19 mg/h

Feststellen der Sättigung des Harzes eingedrungen ist, so ergeben sich die Werte nach Tabelle 5.3. Die Wassermenge, die durch die Messkabeldurchführung selbst oder ihre Dichtungsfläche mit dem Deckel eindringt, kann somit mit 0,19 mg/h für die optimierte Durchführung mit gefülltem EP angenommen werden.

6 Untersuchungen an Hohlisolatoren

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Untersuchungen am Gesamtsystem Hohlisolator dargestellt. Da sich an der ersten Charge der untersuchten Prüfkörper nach ungefähr der Hälfte des geplanten Untersuchungszeitraums eine unerwartete Veränderung zeigt, wird zu diesem Zeitpunkt der Versuch abgebrochen und die Ursache gesucht. Nach Eingrenzung der möglichen Quelle für dieses Verhalten, die beim Hersteller liegt, werden die Versuche mit einer zweiten Charge von Prüfkörpern neu begonnen. Es werden die Ergebnisse beider Chargen, die Veränderung der Prüfkörper der ersten Charge, sowie einige Erkenntnisse aus der Ursachensuche aufgezeigt. Des Weiteren werden Ergebnisse von Untersuchungen an mechanisch vorbelasteten Prüfkörpern präsentiert. Mit den Erkenntnissen dieser drei Versuchsreihen wird das Versuchsverfahren noch einmal vereinfacht und eine letzte Charge von unterschiedlichen Prüfkörpern untersucht. Das Kapitel schließt mit einer Betrachtung aller gewonnenen Ergebnisse.

6.1 Randbedingungen

6.1.1 Klima

Die Untersuchung der Komposit-Hohlisolatoren realer Baugrößen findet bei einem möglichst zeittraffenden Klima in mehreren Prüfkammern (siehe Kapitel 4.4) statt. Es wird eine Temperatur von 80 °C und eine relative Luftfeuchtigkeit von 95 % gewählt. Diese Temperatur stellt einen Kompromiss zwischen einer möglichst hohen Beschleunigung des Permeationsvorgangs (siehe Kapitel 3.6) und einem möglichst ausreichenden Sicherheitsabstand zur Glasübergangstemperatur (siehe Kapitel 2.2.2.1) des GFK des Rohres und des Epoxidklebers der Flanschanbindung dar.

6.1.2 Prüfkörper

Die untersuchten Komposit-Hohlisolatoren bestehen aus im Filament-Winding-Verfahren (2.2.3.2) hergestellten, kreuzgewickelten GFK-Rohren mit einem Glasgehalt zwischen 70 Gew.-% und 75 Gew.-%. Sie sind mit Guss-Armaturen aus Aluminium armiert, die, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, durch eine Kombination aus Epoxidharzklebung und dem Aufschumpfen der Armaturen, aufgebracht werden. Bild 6.1 zeigt eine Skizze der unsilikonisierten Probekörper, das Dichtsystem des Deckels ist in Bild 2.8 genauer gezeigt. Im Anhang zeigen die Bilder A.5 und A.6 Fotos der untersuchten Komposit-Hohlisolatoren.

Wie in Kapitel 4.4.4 begründet, werden Isolatoren zweier Baulängen (»lang« und »kurz«) untersucht, um Rückschlüsse auf die verschiedenen Strecken zuzulassen, durch die Feuchtigkeit in die Isolatoren eindringt. Des Weiteren werden zwei Wanddicken (»dickwandig« und »dünnwandig«) untersucht. Ergänzend zu einer üblichen Wanddicke von 6 mm, wie sie so auch industriell eingesetzt wird, wird auch eine geringere Wanddicke von nur 4 mm untersucht. Dies geschieht zum einen, da eine sehr geringe Wasserdampfpermeation durch das GFK erwartet wird, und nicht feststeht, ob im Untersuchungszeitraum durch normalwandige Isolatoren ausreichend Wasser eindringt, um eine Messung zu ermöglichen. Zum anderen

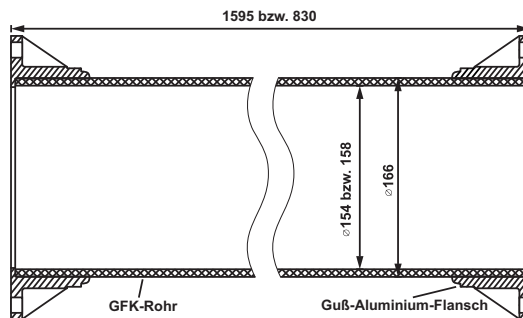


Bild 6.1: Die unsilikonisierten Prüfkörper.

wird im Zuge der Kostenreduzierung bei der Produktion von Betriebsmitteln auch über eine Reduzierung der Wanddicke von Hohlisolatoren nachgedacht, da weniger Material auch weniger Kosten bedeutet. Neben vielen anderen zu beachtenden Punkten, wie z. B. mechanische Stabilität, ist aber auch die Permeation ein Faktor, der bei einer solchen Materialreduzierung beachtet werden muss. Bei einer ersten Charge von Prüfkörpern wird, wie in Kapitel 1.2 erwähnt, auch eine dickwandige Variante mit SiR-Beschirmung geprüft, die im weiteren Verlauf der Untersuchungen nicht mehr vorkommt. Die Gründe dafür werden in Kapitel 6.2 dargelegt.

6.1.3 Versuchsdauer

Die Versuchsdauer ist anfänglich auf 9 Monate festgelegt. Wie ebenfalls in Kapitel 6.2 begründet, verkürzt sich diese jedoch im Laufe der Untersuchungen. Die ursprünglichen 9 Monate ergeben sich auf Grund der Literaturwerte aus Kapitel 3.9.3 aus einer Überschlagsrechnung für die Beschleunigung der Permeation durch das GFK-Rohr. Diese Überschlagsrechnung gilt zwar somit nur für die Permeation durch das GFK-Rohr und nicht für die anderen Wege, über die Feuchtigkeit in den Komposit-Hohlisolator eindringen kann (siehe auch Kapitel 3.1), soll aber als Anhaltspunkt vorerst genügen. Die in das Rohr eindringende Feuchtigkeitsmenge ergibt sich aus den Formeln 3.19 und 3.24 zu:

$$Q = \frac{2\pi t l}{\ln(b/a)} \cdot \Delta p \cdot P_0 \cdot e^{-\frac{E_p}{RT}} \quad (6.1)$$

Fasst man alle Konstanten beim Vergleich baugleicher Rohre zusammen,

$$Q = \text{const.} \cdot \Delta p \cdot e^{-\frac{E_p}{RT}} \quad (6.2)$$

zeigt sich, dass die Temperaturabhängigkeit der Feuchtigkeitsmenge durch Δp und $e^{-\frac{E_p}{RT}}$ bestimmt wird. Berechnet man mit Hilfe der Literaturwerte aus Kapitel 3.9.3 von $\Delta H_S = 40 \text{ kJ/mol}$ und $E_{D,\text{GFK}} = 11,6 \text{ kJ/mol}$ dieses Produkt für 40°C , der höchsten Umgebungslufttemperatur für den Einsatz (nach [IEC GUIDE 111] und [IEC 60721-1]), und 80°C , so ergeben sich aus $\Delta p \cdot e^{-\frac{E_p}{RT}}$ die Faktoren $1,7 \cdot 10^{-7}$

und $1,0 \cdot 10^{-5}$. Dies führt zu einem Beschleunigungsfaktor von ≈ 60 . Mit den geplanten 9 Monaten beschleunigter Klimabelastung lassen sich somit rein rechnerisch 45 Jahre nachbilden. Dies ist für die erwartete Lebensdauer eines Komposit-Hohlisolators großzügig bemessen.

6.2 Die erste Charge neuwertiger Prüfkörper

6.2.1 Vorkommnisse während der Prüfung

Nach einer Versuchsdauer von 7 Monaten muss eine mit Prüfkörpern gefüllte Kammer geöffnet werden, da eine Undichtigkeit am Wasserreservoir auftritt. Ursprünglich ist eine Reparatur des Reservoirs und eine Wiederinbetriebnahme innerhalb eines Tages geplant. Bei der Entnahme der Prüfkörper zeigt sich jedoch eine unerwartete Veränderung der Oberfläche (siehe Bild 6.2). Der visuelle Eindruck ist der eines »Abschmelzens« und »Herunterlaufens« der Epoxidharzdeckschicht. Die oberste Lage Glasfasern liegt teilweise frei, und an den unteren Flanschen zeigt



Bild 6.2: Optische Eindrücke nach der Entnahme der Prüfkörper von Charge 1 aus Kammer 1.

sich teilweise ein lackartiger Überzug. Auf den Rohroberflächen finden sich teilweise »Luftnasen« und »-bahnen« aus Harz.

Schneidet man ein Stück SiR eines der silikonisierten Rohre rechteckig ein, so lässt sich dieses sehr leicht von der GFK-Oberfläche abziehen. Auch unter der Silikonschicht ist das Epoxidharz brüchig, teilweise verlaufen, und einzelne Faserschichten liegen durch das Abbröckeln des Harzes frei. Das SiR hat somit keinerlei Einfluss auf diese Veränderung. Sie tritt darunter genauso auf wie auf unsilikonisierten Rohren.

Die Oberfläche ist leicht dunkel verfärbt, was sich jedoch relativ schnell auf die Korrosionsspuren der verzinkten Schrauben zurückführen lässt. Diese Rostspuren werden über die Oberfläche verteilt. Auf Grund der Verläufe dieser Farbspuren lässt sich erkennen, dass teilweise eine Betauung der Prüfkörper stattfindet. Mit den herunterlaufenden Wassertropfen verteilt sich dann die Rostfärbung über das ganze Rohr. Dies hat aber nichts mit der Veränderung der Konsistenz der Harzschicht zu tun. Ist kein flüssiges Harz über die Rostspuren gelaufen, so lassen sich diese mit Wasser oder Alkohol leicht entfernen. Nur wenn sich die Farbspuren mit dem flüssigen Harz vermischt haben, ist ein Entfernen nicht möglich.

Da diese Veränderung der Oberfläche auch unter Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Betauung nicht normal ist, werden auch aus anderen Kammern Prüfkörper entnommen. Diese weisen teilweise gleiche oder ähnliche, unterschiedlich fortgeschrittene, Anzeichen auf. Bei manchen sind insgesamt weniger Laufspuren zu erkennen, oder diese sind nur an der Oberfläche der Rohre vorhanden, aber es hat sich noch kein Überzug auf den Flanschen abgelagert.

Es zeigt sich, dass die Oberfläche der veränderten Prüfkörper auf eine Behandlung mit Aceton reagiert. Versucht man mit einem acetongetränkten Wattebausch die Oberfläche anzulösen und wischt dann mit der Watte darüber, so bleiben Watefasern auf der klebrigen Oberfläche hängen. Dieses Verhalten ist in Bild 6.3 zu erkennen. Da dieses Verhalten von üblichen GFK-Rohren, wie sie zur Herstellung von Komposit-Hohlisolatoren genutzt werden, nicht bekannt ist, ist es möglich, dass die Lösbarkeit mit Aceton und die festgestellte Oberflächenveränderung die gleiche Veränderung des Materials anzeigen. Darum werden alle vorhandenen Prüf-



Bild 6.3: Oberflächenuntersuchung an Prüfkörpern der Charge 1 mit Aceton.

körper, sowohl für diese Untersuchungen als auch für weitere Prüfungen im Zuge des in Kapitel 1.2 dargestellten Gesamtforschungsprojektes, mit dieser Methode überprüft. Es zeigt sich, dass 24 % der Isolatoren eine starke Oberflächenveränderung unter Aceton aufwiesen und 33 % eine leichte, so dass insgesamt 57 % davon betroffen sind.

Verschiedene Untersuchungen¹ zeigen, dass die Glasübergangstemperatur in der Harzdeckschicht nur bei 65 °C statt bei 148 °C liegt. Außerdem lassen sich mit Hilfe einer Gas-Chromatographie Anhydridverbindungen in dieser Außenharzschicht nachweisen, die vermutlich aus nicht ausgehärteten Härterresten stammen. Vermutlich sind sie durch Feuchtigkeit inhibiert und standen zur Härtung des Harzes nicht mehr zur Verfügung. Bei der Herstellung von Epoxidharzen muss aber auf Grund der Polyaddition als Vernetzungsreaktion das stöchiometrische Mischungsverhältnis zwischen Harz und Härter sehr genau eingehalten werden, da sonst unausgehärtete Komponenten in der Formmasse verbleiben (siehe Kapitel 2.2.2). Es wird insbesondere eine vielfach erhöhte Hydrolyse-Anfälligkeit des hier vorliegenden Deckharzes vermutet.

Der Hersteller konnte die untersuchte Charge zurückverfolgen und hat eine Unregelmäßigkeit im Produktionsprozess dieser Charge festgestellt. Die Fehlerquelle wurde daraufhin durch eine nachhaltige Verbesserung der Fertigung behoben, und es steht nicht zu erwarten, dass sich dies bei einer erneuten Fertigung wiederholt.

¹ Die Untersuchungen wurden von der MPA, der Staatlichen Materialprüfungsanstalt Darmstadt, durchgeführt, die an Bereichen des unter 1.2 dargestellten Gesamtforschungsprojekts beteiligt ist.

Da nicht genau festgestellt werden kann, welche der untersuchten Prüflinge gegebenenfalls, wenn auch möglicherweise in geringerem Ausmaß, von diesem Problem betroffen sind, und ob diese Veränderung der Oberfläche einen Einfluss auf die zu messenden Werte des eingedrungenen Wassers hat, werden alle Prüfkörper ausgetauscht. Die Untersuchungen werden nach der Fertigung der neuen Prüfkörper, den Prüfkörpern der zweiten Charge, erneut begonnen.

Aus den bis dahin erzielten Messungen können jedoch schon folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die SiR-Beschirmung bietet keinen nennenswerten Schutz gegen die Hydrolyseerscheinungen des Deckharzes. Es ist somit anzunehmen, dass die SiR-Beschirmung für das permeierende Wasser kein nennenswertes Hindernis darstellt. Dies wurde auch schon in Kapitel 2.3 vermutet. Aus diesem Grund kann in der Wiederholung der Versuche auf Komposit-Hohlisolatoren mit SiR-Beschirmung verzichtet werden. Diese waren nur untersucht worden, um eine Barrierewirkung des SiR festzustellen bzw. auszuschließen. Da sie jedoch sowohl in der Handhabung komplizierter sind als auch mehr Platz in den Untersuchungskammern beanspruchen, wird zugunsten einer erhöhten Anzahl an unsilikonisierten Prüfkörpern im Weiteren auf sie verzichtet. Dies ermöglicht eine bessere statistische Absicherung der Messergebnisse für unsilikonisierte Prüfkörper.
- Es zeigt sich, dass die bis hierher gewonnenen Messwerte (siehe Bild 6.4) sowohl bei geschädigten als auch bei augenscheinlich ungeschädigten Probekörpern einen linearen Verlauf aufweisen. Dieser hat sich im Laufe von neun Monaten nicht wesentlich verändert. Insofern ist offensichtlich auch eine kürzere Versuchsdauer möglich, um gleichwertige Aussagen zu erhalten. Die Dauer des Versuchs wird auf sechs bis sieben Monate verkürzt. Dieser Zeitraum reicht aus, um eventuelle Anfangsbedingungen zu einem stetigen Gleichgewicht kommen zu lassen und verlässliche Messwerte aus den Kurven ablesen zu können.

- In keinem Fall wird in der Versuchszeit eine Sättigung der eingebrachten Trockenmittelbeutel erreicht. Es ist also ausreichend, zwei Trockenmittelbeutel einzubringen.
- Es wird ein signifikanter und reproduzierbarer Gewichtsanstieg gemessen. Er liegt bei ca. 30 g. Die Messunsicherheit der gesamten Messkette, über Messzelle, Verstärker, Umschalter und Messkarte wird durch Messungen und Abschätzungen ermittelt. Die Standardabweichung liegt im relevanten Messbereich von ca. 200 g bei 0,01 % und die Linearitätsabweichung über 30 g bei 0,05 %. Zusammen mit den weiteren Beiträgen ergibt sich eine maximale Messunsicherheit von 0,2 %. Bei einem zu messenden Gewicht von ca. 200 g wären dies ca. 0,4 g. Auf Grund der relativ konstanten Temperatur kann jedoch sogar von einer wesentlich geringeren Messunsicherheit ausgegangen werden. Die Messmimik ist somit ausreichend genau, um über einen längeren Zeitraum den stattfindenden Gewichtsanstieg zu erfassen. Auch die Befürchtung, die Gewichtssteigerung könnte unterhalb der messbaren Grenze liegen, hat sich durch die gemessenen 30 g als gegenstandslos erwiesen.

6.2.2 Veränderungen als Folge der Prüfung der ersten Charge

Auf der Basis der in Kapitel 6.2.1 beschriebenen Vorkommnisse und Erkenntnisse wird nach einer Überarbeitung der Versuchstechnik eine neue Versuchsreihe gestartet, sobald neue Probenkörper verfügbar sind.

Zu den Veränderungen am Versuchsaufbau zwischen erster und zweiter Charge zählt folgendes:

- Die Durchführungen werden neu gefertigt und nun mit einem gefüllten Epoxidharz vergossen, da einige Durchführungen durch den Versuch beschädigt wurden (siehe auch Kapitel 4.4.2.1)
- Das Wasserreservoir der Prüfkammern (siehe Kapitel 4.4), welches wie die Kammerwände aus einem speziellen Polyethylen bestand, wird gegen eine Metallwanne ausgetauscht, da das Material bei den thermischen Belastungen, insbesondere auf Grund der Wärmeausdehnung, immer wieder undicht wird.

- Ebenso werden die Standtische (siehe Kapitel 4.4), auf denen die Prüfkörper über dem Wasserreservoir stehen, gegen metallene ausgetauscht, da auch hier der verwendete Kunststoff der kombinierten Belastung aus Temperatur und Feuchte nicht standhält.
- Des Weiteren erweist sich das verwendete temperatur- und feuchtigkeitsfeste Kabel, mit welchem die Messdaten aus den Prüfkörpern zum Messgerät übertragen werden (siehe auch Kapitel 4.4.2.1), als nicht ausreichend diffusionsdicht. Innerhalb des Kabels wird eingedrungenes Wasser bis zur außerhalb der Prüfkammern stehender Messelektronik weitergeleitet und droht diese zu beschädigen. Es wird bei der Neukonstruktion der Messdurchführung gegen ein Kabel mit besserer Feuchtigkeitsbeständigkeit und einem höheren Temperatureinsatzbereich ausgetauscht.

Durch diese Verbesserungen können die weiteren Messungen mit weniger Problemen am Messaufbau durchgeführt werden.

6.2.3 Erläuterungen zur Auswertung der Messwerte

Eine beispielhafte Erläuterung der Messwerte soll am Diagramm einer DMS-Waage in Bild 6.4 vorgenommen werden. Man erkennt auf dem linken Diagramm, dass

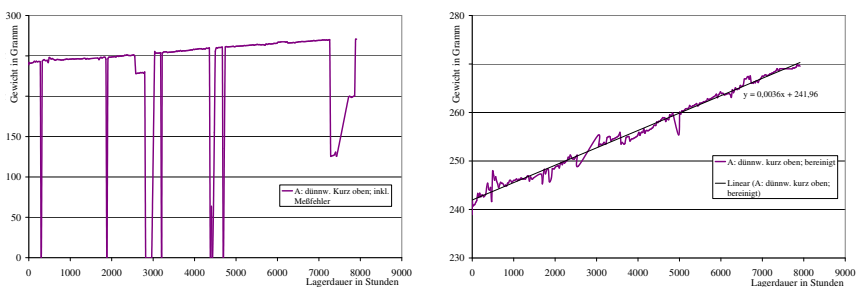


Bild 6.4: Diagramm der Messergebnisse eines kurzen dünnwandigen Prüfkörpers der ersten Charge. Links: inklusive Messfehlern durch z. B. Stromausfall. Rechts: bereinigt um diese erkläraren und nachprüfaren Messfehler.

bei jeder Aufnahme von Messergebnissen auch Messfehler, z. B. durch Stromausfall an der Messelektronik, mitgeloggt werden. Sofern diese Messfehler nachvollziehbare Ursachen haben, werden sie bei allen weiteren Auswertungen ohne weitere Anmerkung aus den Diagrammen entfernt.

Auf dem rechten Diagramm erkennt man einen linear ansteigenden Verlauf der Messkurve. Auch hier sind noch kleinere Schwankungen zu sehen. Diese können verschiedene Ursachen haben. Einerseits verursachen Erschütterungen während der Aufnahme der Messwerte in der Umgebung des Messaufbaus leichte Abweichungen des Messwerts vom eigentlichen Wert. Die Messungen werden zur Reduzierung dieser Einflüsse nachts durchgeführt (siehe auch Kapitel 4.4.3.1). Jedoch können trotzdem immer wieder Erschütterungen z. B. durch vorbeifahrende LKW stattfinden, die die Messwerte leicht schwanken lassen. Des Weiteren sind die gezeigten Messwerte mit einer Nullpunktmessung, die jeweils vor Beginn des Messvorgangs aufgenommen wird, korrigiert (siehe auch Kapitel 4.4.2.1). Da der Korb, in dem sich das Trockenmittel befindet, an kleinen Ketten am DMS hängt, kann es passieren, dass nicht alle Kettenglieder immer gleich positioniert sind, sondern sich evtl. eines davon verhakt und somit den Messwert der Nullpunktmessung verändert. Denn auch wenn die DMS-Waage durch die Halteeinrichtung entlastet ist, ist die Kette immer noch an der DMS-Waage befestigt und die ersten Kettenglieder werden mitgewogen. Auch hieraus können Schwankungen der Messwerte resultieren. Betrachtet man die Werte jedoch als Kurve über einen ausreichend langen Zeitraum, so erkennt man den linearen Anstieg, an dessen Steigung man die stetig in den Komposit-Hohlisolator eindringende Wassermenge ablesen kann. Für den in Bild 6.4 gezeigten Prüfkörper sind dies 3,6 mg/h.

6.2.4 Ergebnisse der ersten Charge

Die Tabelle 6.1 zeigt die Werte, die von den Prüfkörpern der ersten Charge auf die in Kapitel 6.2.3 beschriebene Art und Weise ermittelt werden können.

Auf Grund der beschriebenen Zerstörung einiger Messkabeldurchführungen sind nicht für alle untersuchten Probekörper Messwerte vorhanden. Auch sind diese Messwerte auf Grund der erfolgten Oberflächenveränderung, deren Einfluss nicht

Tabelle 6.1: Ergebnisse der ersten Charge von Prüfkörpern, die auf Grund der beschriebenen unbekannten Oberflächenveränderung nur sehr eingeschränkt gültig sind.

Nr.	Rohrlänge	Wanddicke	SiR-Beschirmung	Gewichtsanstieg
A	kurz	dünn	ohne	3,6 mg/h
B	lang	dick	ohne	5,0 mg/h
C	lang	dünn	ohne	8,0 mg/h
D	lang	dick	ohne	5,6 mg/h
I	lang	dick	ohne	5,4 mg/h
K	lang	dick	mit	8,0 mg/h
L	lang	dick	mit	5,5 mg/h
M	kurz	dick	mit	3,4 mg/h
N	lang	dick	mit	3,6 mg/h
O	lang	dick	mit	4,0 mg/h
R	kurz	dick	ohne	1,9 mg/h

Tabelle 6.2: Ergebnisse der ersten Charge von Prüfkörpern in Matrixform.

kurz, dünnw., ohne 3,6 mg/h	kurz, dickw., ohne 1,9 mg/h	kurz, dickw., mit 3,4 mg/h
lang, dünnw., ohne 8,0 mg/h	lang, dickw., ohne 5,4 mg/h bzw. 5,6 mg/h	lang, dickw., mit 8,0 mg/h bzw. 5,5 mg/h bzw. 4,0 mg/h bzw. 3,6 mg/h

näher bekannt ist, mit großer Vorsicht zu betrachten. Möchte man trotzdem erste Erkenntnisse aus diesen Messungen ablesen, kann man sie, wie in Tabelle 6.2 angeordnet, überschauen. Es zeigt sich bei langen Komposit-Hohlisolatoren ohne SiR-Beschirmung, egal ob dünn oder dickwandig, mehr als doppelt so viel Wassereintritt wie bei den kurzen. Jedoch liegt hier für die kurzen Rohre jeweils nur ein Ergebnis vor. Bei dickwandigen ist die Menge geringer als bei dünnwandigen. Aber auch hier gibt es jeweils nur einen Vergleichswert. An den langen dickwandigen silikonisierten Prüfkörpern sieht man, dass die einzelnen Prüfkörper untereinander eine große Bandbreite aufweisen. Dies kann auf die unterschiedliche Schädigung der Rohroberfläche auf Grund des oben beschriebenen Fertigungsproblems

zurückzuführen sein und zeigt, dass die hier gewonnenen Ergebnisse ohne nähere Kenntnisse zu den Auswirkungen dieser Schädigungen nicht zu verwenden sind. Es zeigt auch, dass es notwendig ist, mehrere gleichartige Prüfkörper zu untersuchen, um solche Schwankungen festzustellen und zu quantifizieren.

6.3 Die zweite Charge neuwertiger Prüfkörper

Die Untersuchungen werden nach den in Kapitel 6.2 näher beschriebenen Vorfällen mit neuen Probekörpern wieder aufgenommen. Die Versuche laufen in drei verschiedenen Prüfkammern (siehe Kapitel 4.4) jeweils mindestens sieben Monate. Die Gewichtsmessung des eingebrachten Trockenmittels findet wie in Kapitel 4.4.2.1 beschrieben regelmäßig automatisiert statt. Die aufgenommenen Messwerte werden, wie in Kapitel 6.2 ausführlicher beschrieben, um die Messfehler mit nachvollziehbarer Ursache bereinigt. Sie werden graphisch dargestellt und aus der Steigung der Kurve wird die eindringende Wassermenge pro Zeiteinheit berechnet. Dabei werden zwei Veränderungen gegenüber der üblichen Auswertung vorgenommen.

- In Bild 6.5 ist zu sehen, dass die Messergebnisse von Prüfling 5, wenn man die Nullpunktmessung beachtet, beträchtliche Schwankungen aufweisen. Die Messwerte ohne Beachtung der Nullpunktmessung sind hingegen wesentlich

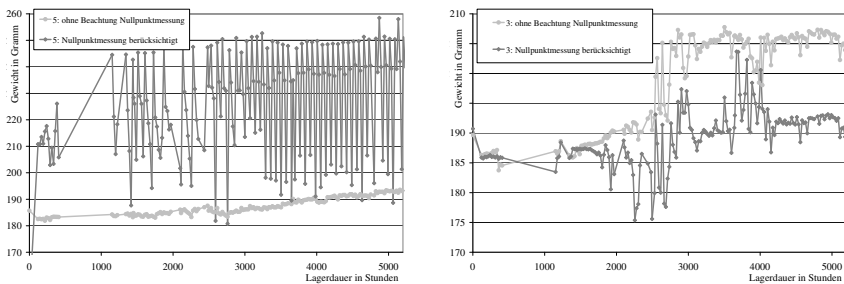


Bild 6.5: Diagramm der Messergebnisse der Prüflinge 3 und 5 aus der zweiten Charge.

linearer. Hier kommen die Schwankungen hauptsächlich aus der Nullpunkt-messung. Wie sich beim späteren Öffnen der Prüfkörper nach Ende der Versuchszeit herausstellt, war hier die Kette, mit der die Trockenmittelbeutel an den DMS befestigt werden (siehe auch Kapitel 4.4.2.1), in mehreren Ketten-gliedern verhakt. Dies muss, bei Betrachtung der Messwerte, nach den ers-ten Messungen passiert sein, und führte dazu, dass bei jeder Entlastung ein extrem unterschiedlicher Zug auf die Ketten wirkt. Eine wirkliche Nullpunkt-messung ist somit nicht mehr möglich. Aus diesem Grund wird für Prüfkör-per 5 der Wert der Messungen ohne Nullpunktbeachtung ausgewertet. Jedoch sind diese Werte dementsprechend nur mit Einschränkungen auswertbar, da die, wenn auch sehr geringe, Nullpunkt-drift des DMS nicht beachtet werden kann. Auch ist es möglich, dass die Nullpunkt-drift bei diesem DMS anders ausgefallen ist, als dies mit den weiteren DMS dokumentiert wurde, da er nicht komplett entlastet werden konnte, sondern in einigen Fällen trotzdem ein Zug durch die Ketten auf ihn wirkte.

- Ebenso erkennt man auf Bild 6.5, dass die Messwertkurven von Prüfkörper 3 ab ca. 2 000 h Lagerdauer erheblich schwanken. In diesem Fall liegen die Schwankungen sowohl auf der Kurve mit, als auch auf der ohne Beachtung des Nullpunktes. Hier schwankt also wirklich der gewogene Messwert. So-mit ist eine Auswertung dieser Messwerte nicht möglich. Der entsprechende DMS ist in irgendeiner Weise beschädigt und gibt keine vertrauenswürdigen Messwerte aus. Aus diesem Grund wird im Weiteren auf die Auswertung des Prüfkörpers 3 komplett verzichtet. Somit steht von der Variante der dickwan-digen kurzen Komposit-Hohlisolatoren ein Prüfling weniger zur Auswertung zur Verfügung.

6.3.1 Auswertung der Messergebnisse

Für alle Prüfkörper wird eine Auswertung wie in Kapitel 6.2 beispielhaft beschrie-ben vorgenommen. Die Auswertung für Kammer 2 ist beispielhaft in Bild 6.6 dar-gestellt. Dabei ist für die kurzen Probekörper auch der Lagerungsort angegeben. Da immer zwei kurze Prüfkörper übereinander gestellt werden, gibt es jeweils

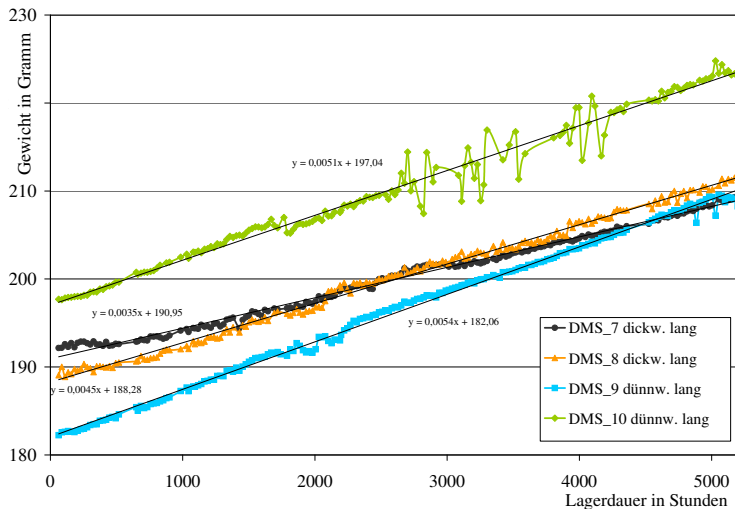


Bild 6.6: Auswertung der Messergebnisse einer Kammer der zweiten Charge neuwertiger Prüfkörper.

einen unten und einen oben gelagerten (siehe auch Bild 4.3). Es ergeben sich daraus eindringende Wassermengen nach Tabelle 6.3. Zur besseren Übersicht sind diese Ergebnisse in Tabelle 6.4 in einer Matrix nach Prüfkörperarten zusammengefasst.

Wie man schnell erkennt, sind die Schwankungen innerhalb der gleichen Bauvariante genauso groß wie die Unterschiede der Varianten gegeneinander. Es ist jedoch eindeutig zu erkennen, dass die langen Varianten, deren GFK-Länge doppelt so lang ist wie die der kurzen Variante, nicht doppelt so viel Wassereintritt aufweisen wie die kurzen. Selbst wenn man jeweils den kleinsten gemessenen Wert der kurzen Varianten heranzieht, 2,4 mg/h bei dünnwandigen und 2,0 mg/h bei dickwandigen, so zeigt sich, dass bei den langen Varianten auch weniger als das Doppelte dieser Werte gemessen wird. Es ist somit auszuschließen, dass die eindringende Wassermenge ausschließlich über das GFK in den Komposit-Hohlisolator eindringt.

Tabelle 6.3: Ergebnisse der zweiten Charge von Prüfkörpern.

Nr.	Rohrlänge	Anordnung	Wanddicke	Prüfkammer	Gewichtsanstieg
1	kurz	unten	dick	1	2,0 mg/h
2	kurz	unten	dünn	1	2,7 mg/h
4	lang		dünn	1	2,7 mg/h
5	lang		dick	1	2,4 mg/h
6	kurz	oben	dünn	1	2,4 mg/h
7	lang		dick	2	3,5 mg/h
8	lang		dick	2	4,5 mg/h
9	lang		dünn	2	4,5 mg/h
10	lang		dünn	2	5,1 mg/h
11	kurz	unten	dünn	3	5,8 mg/h
12	kurz	oben	dünn	3	5,2 mg/h
13	lang		dünn	3	7,9 mg/h
14	lang		dick	3	5,8 mg/h
15	kurz	unten	dick	3	4,7 mg/h
16	kurz	oben	dick	3	2,9 mg/h

Tabelle 6.4: Ergebnisse der zweiten Charge von Prüfkörpern in Matrixform.

	kurz, dünnw.	kurz, dickw.
oben	2,4 mg/h bzw. 5,2 mg/h	2,9 mg/h
unten	2,7 mg/h bzw. 5,8 mg/h	2,0 mg/h bzw. 4,7 mg/h
	lang, dünnw.	lang, dickw.
	2,7 mg/h bzw. 4,5 mg/h	2,4 mg/h bzw. 3,5 mg/h
	5,1 mg/h bzw. 7,9 mg/h	4,5 mg/h bzw. 5,8 mg/h

6.3.1.1 Möglicher Einfluss der Kammertemperatur

Da die Prüfkammern auf Grund der benötigten großen Bauweise nicht immer die gleiche Temperatur halten, sondern unter dem Einfluss der Umgebungstemperatur um bis zu $\pm 4^\circ\text{C}$ Grad schwanken, könnte unter Umständen eine unterschiedliche Lagertemperatur die Ursache der weiter oben beschriebenen Schwankungen

Tabelle 6.5: Ergebnisse der zweiten Charge von Prüfkörpern in Matrixform bezogen auf die Prüfkammern.

⊙ Temperatur	Kammer 1 77 °C	Kammer 2 74 °C	Kammer 3 79 °C
lang, dickw.	2,4 mg/h	3,5 mg/h bzw. 4,5 mg/h	5,8 mg/h
kurz, dickw., oben			2,9 mg/h
kurz, dickw., unten	2,0 mg/h		4,7 mg/h
lang, dünnw.	2,7 mg/h	4,5 mg/h bzw. 5,1 mg/h	7,9 mg/h
kurz, dünnw., oben	2,4 mg/h		5,2 mg/h
kurz, dünnw., unten	2,7 mg/h		5,8 mg/h

gleicher Varianten sein. Da die Kammern jedoch alle parallel der gleichen Umgebungstemperatur ausgesetzt sind, verlaufen auch die Temperaturschwankungen parallel. Lediglich durch die zeitversetzte Inbetriebnahme der Kammern ergeben sich unterschiedliche Durchschnittstemperaturen für die Kammern. Trägt man die Ergebnisse in einer weiteren Matrix unter Berücksichtigung der Kammer und der durchschnittlichen Kammertemperatur über die jeweilige Versuchsdauer auf, so ergibt sich Tabelle 6.5.

Es zeigt sich, dass Kammer 1 die niedrigsten Werte in jeder Variante aufweist, Kammer 2 liegt in der Mitte, und Kammer 3 hat die höchsten Werte in jeder Variante. Dies entspricht jedoch nicht den unterschiedlichen Temperaturverteilungen, denn die niedrigste Durchschnittstemperatur hat Kammer 2. Erst dann kommt Kammer 1, während Kammer 3 die höchste Durchschnittstemperatur aufweist.

Auch wenn in diesem Fall die unterschiedlichen Lagertemperaturen sich nicht direkt in den Messergebnissen widerspiegeln, zeigt diese Betrachtung doch, dass die Beheizung der Kammern durch heißes Öl mit einer konstanten Temperatur in Heizwendeln nicht zu ausreichend konstanten Kammertemperaturen führt. Gerade der Einfluss der jahreszeitlich bedingten Schwankungen der Umgebungstemperatur schlagen sich wesentlich stärker als erwartet in der Kammertemperatur nieder und führen beim zeitversetzten Starten der Kammern zu unterschiedlichen durchschnittlichen Lagertemperaturen.

6.3.1.2 Möglicher Einfluss der Kammerfeuchte

Ein weiterer Faktor, der das Eindringen des Wassers neben der Permeation beeinflusst, ist die Luftfeuchtigkeit. Obwohl die Luftfeuchtigkeit ebenso wie die Temperatur überwacht wird und sich zwischen 95 % relativer Luftfeuchte und Sättigung bewegt, muss dies einen großen Einfluss haben. Die Luftfeuchtigkeit in Kammer 1 war während der kompletten Versuchzeit am niedrigsten. Zwischen den Kammern 2 und 3 ist kein Unterschied diesbezüglich nachzuweisen.

Auf Grund der hier aufgeführten Ergebnisse werden Versuche mit den verwendeten Feuchtigkeitsfühlern durchgeführt. Es zeigt sich, dass diese auf ein Absinken der Luftfeuchtigkeit nach einer anfänglichen Betauung, oder der Detektion von 100 % relativer Luftfeuchtigkeit, erst zeitversetzt reagieren. Es ist keine genaue Angabe über die Länge dieser Zeitverzögerung möglich, da diese stark schwankt. Insofern ist es nicht möglich, aus den aufgezeichneten Feuchtwerten der Kammern 2 und 3 abzulesen, welche über den gesamten Versuchszeitraum einer höheren relativen Luftfeuchtigkeit ausgesetzt ist, denn die Klimafühler detektieren immer wieder über längere Zeit einen Wert von 100 %. Wie lange dieser jedoch wirklich vorliegt, ist auf Grund des geschilderten Verhaltens der Fühler nicht anzugeben.

Es ist weiterhin bekannt, dass Kammer 1 mehrere Male auf Grund von Undichtigkeiten kurzzeitig (< 1 Tag) ohne ein Wasserreservoir in Betrieb war. Dies kann dazu geführt haben, dass die Luftfeuchtigkeit in der verschlossenen Kammer gesunken ist und es evtl. zu Trocknungen gekommen ist. Wurde danach wieder ausreichend Wasser zur Verfügung gestellt, um die gewünschte Luftfeuchtigkeit zu erreichen, benötigte der Prüfling einige Zeit, um an der GFK-Oberfläche wieder eine Sättigung zu erreichen.

Auch die Unterschiede von kurzen Prüflingen in Abhängigkeit ihres Standortes (unten oder oben) lässt sich auf die Luftfeuchtigkeit zurückführen. Auf Grund der über die gesamte Kammerhöhe verlaufenden Heizwendel und der Tatsache, dass Wärme aufsteigt, homogenisiert sich die Temperatur in der Kammer sehr schnell. Für die Luftfeuchtigkeit gilt dies jedoch nicht. Die Feuchtigkeit wird am Kammerboden zur Verfügung gestellt, dort von der vorbeiströmenden Luft aufgenom-

men und nach oben transportiert. Diese Luftströmung wird durch den eingebrachten Ventilator (siehe Kapitel 4.4) unterstützt. Messungen ergaben eine annähernde Gleichverteilung der Feuchtigkeit über die Kammerhöhe mit maximalen Schwankungen um ± 1 % relativer Luftfeuchte. Aus den gemessenen Werten, die für unten stehende Isolatoren immer höher sind als für darauf stehende oben gelagerte, lässt sich jedoch interpretieren, dass auch schon geringe Unterschiede in der Luftfeuchtigkeit einen nennenswerten Unterschied in der Permeation bewirken.

6.3.1.3 Beachtung der Dichtigkeitmessungen der Einzelaufbauten

Auf Grund der bisher beschriebenen Erkenntnisse ist die Auswertung bezüglich des Vergleichs der Varianten nur innerhalb einer Kammer vorzunehmen. Hierfür sollte auch die Wassermenge beachtet werden, die durch die zwei in Einzelaufbauten untersuchten Dichtstrecken in den Komposit-Hohlisolator eingedrungen ist. Aus Kapitel 5.3 ist bekannt, dass durch einen schon einmal in Benutzung gewesenen Deckel, was auf alle Deckel dieser Charge zutrifft, eine eindringende Wassermenge von 0,9 mg/h zu erwarten ist. Durch die Kabeldurchführungen gelangt nach Kapitel 5.4 eine Wassermenge von 0,2 mg/h ins Isolatorinnere. Zieht man an allen untersuchten Probekörpern diese in Summe 1,1 mg/h ab, so ergibt sich die modifizierte Tabelle 6.6.

Hieraus lassen sich folgende Aussagen ablesen:

Tabelle 6.6: Ergebnisse der zweiten Charge von Prüfkörpern in Matrixform bezogen auf die Prüfkammern, abzüglich der Wassermengen durch Deckel und Durchführung.

	Kammer 1	Kammer 2	Kammer 3
lang, dickw.	1,3 mg/h	2,4 mg/h bzw. 3,4 mg/h	4,7 mg/h
kurz, dickw., oben			1,8 mg/h
kurz, dickw., unten	0,9 mg/h		3,6 mg/h
lang, dünnw.	1,6 mg/h	3,4 mg/h bzw. 4,0 mg/h	6,8 mg/h
kurz, dünnw., oben	1,3 mg/h		4,1 mg/h
kurz, dünnw., unten	1,6 mg/h		4,7 mg/h

- Bei dünnwandigen Rohren gelangt mehr Feuchtigkeit in den Hohlisolator als bei dickwandigen. Die Wandstärke der dickwandigen Rohre beträgt 6 mm, bei den dünnwandigen ist es $1/3$ weniger, also 4 mm. Die Feuchtigkeitsmenge kann bei den vorliegenden Schwankungen als grob proportional interpretiert werden. Jedoch ist dies auf Grund der Schwankungen innerhalb einer Variante nur bedingt vertrauenswürdig.
- In kurze Komposit-Hohlisolatoren gelangt weniger Feuchtigkeit als in doppelt so lange. Jedoch gelangt in die kurzen mehr als die Hälfte der Feuchtigkeit gegenüber der Menge, die in doppelt so lange eindringt. Es besteht somit kein erkennbarer proportionaler Zusammenhang zwischen GFK-Länge und Feuchtigkeitsmenge.
- Die Wassermengen, die durch gleichartige Varianten von Prüfkörpern, die unter gleichen klimatischen Bedingungen und in der gleichen Höhe in derselben Prüfkammer gelagert wurden, eingedrungen sind, unterscheiden sich um bis zu 30 %.

Da bei den betrachteten Werten die über andere Wege als das GFK-Rohr in den Komposit-Hohlisolator eindringende Feuchtigkeit schon herausgerechnet wurde und die Werte sich trotzdem nicht proportional zur Länge des GFK verhalten, muss es noch einen weiteren Weg geben, über den Feuchtigkeit in den Komposit-Hohlisolator eindringt. Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, kann dies die Verbindung zwischen dem GFK-Rohr und der Armatur sein, auch wenn diese im Allgemeinen als dicht betrachtet wird.

Stellt man z. B. für die dünnwandigen Prüfkörper aus Kammer 3 mit den Werten des langen und des oberen kurzen Rohres eine Gleichung in der Annahme auf, dass es eine weitere Quelle einer konstanten Feuchtigkeitseinwanderung gibt

$$\begin{aligned}
 m_{\text{GFK}} + x &= 6,8 \text{ mg/h} \\
 m_{\text{GFK}/2} + x &= 4,1 \text{ mg/h} \\
 6,8 \text{ mg/h} - x &= 8,2 \text{ mg/h} - 2 \cdot x \quad ,
 \end{aligned}
 \tag{6.3}$$

so ergäbe sich für diese ein Wert von $x = 1,4 \text{ mg/h}$. Eine Überprüfung an den weiteren vorhandenen Werten zeigt jedoch keine Übereinstimmung. Es ergeben sich je nach Kammer und Variante Werte zwischen $0,5 \text{ mg/h}$ und $2,6 \text{ mg/h}$. Die Quelle der zusätzlichen Wassermenge ist also nicht konstant. Wäre diese Quelle die Verbindung zwischen Rohr und Armatur, so ließen sich diese unterschiedlichen Werte durch die Handarbeit, in der die Klebung meist ausgeführt wird, erklären. Je nach Klebenauftrag könnte hier z. B. ein Unterschied resultieren.

Für die Varianz der gleichartigen Prüfkörper untereinander könnte ebenfalls die gerade beschriebene Quelle der zusätzlichen Feuchtigkeitseinwanderung die Ursache sein. Es könnte sein, dass sie so stark streut, dass die Unterschiede allein aus dieser Quelle resultieren. Eine weitere mögliche Ursache ist das GFK-Rohr selbst. Die Fertigung im Filament-Winding-Verfahren, wie in Kapitel 2.2.3.2 beschrieben, ist nicht exakt reproduzierbar. Es können unterschiedliche Lufteinschlüsse im Harz vorhanden sein, und es besteht auch die Möglichkeit leicht unterschiedlicher Harzdicken. Unterschiede in der Permeation von bis zu 38 % allein durch minimale Fertigungsabweichungen erscheinen jedoch eher unwahrscheinlich.

Die Untersuchungen an neuwertigen ungeschützten Komposit-Hohlisolatoren zeigen, dass durch dünnwandige Rohre mehr Feuchtigkeit in den Hohlisolator gelangt als bei dickwandigen. Die Menge scheint annähernd proportional zur Wanddicke zu sein, was jedoch ohne Vergleichsmessungen an weiteren Wanddicken nicht genau zu belegen ist. Ebenso gelangt mehr Feuchtigkeit in lange, als in kurze Komposit-Hohlisolatoren. Eine Proportionalität zur GFK-Länge ist nicht ersichtlich, was nahelegt, dass es einen weiteren, bisher unbekannten oder unbeachteten Weg gibt, über den Wasser eindringt. Da sich die Werte gleichartiger Prüfkörper bei gleicher Belastung um bis zu ein Drittel des Wertes unterscheiden, was aus Fertigungs- oder Materialunterschieden oder auch aus der begrenzten Messgenauigkeit resultieren kann, sind exakte Aussagen zu den Auswirkungen der vorgenommenen Variationen wie Wanddicke oder Länge nicht möglich. Der größte gemessene Wert für einen heutzutage üblichen (langen und dickwandigen) Komposit-Hohlisolator beträgt $5,8 \text{ mg/h}$.

6.4 Mechanisch vorbelastete Prüfkörper

Neben den neuwertigen Prüfkörpern, deren Messwerte in Kapitel 6.3 beschrieben sind, werden auch mechanisch vorbelastete untersucht. Dabei werden lediglich dickwandige Komposit-Hohlisolatoren betrachtet, da sie die derzeit übliche Wanddicke darstellen. Die Lagerung der Prüfkörper und die Auswertung der Messergebnisse ist dabei gleich der der neuwertigen Prüfkörper. Es wurden ausschließlich dickwandige Probenkörper untersucht. In Tabelle 6.7 sind die Messergebnisse der Prüfkörper zusammen mit der erfolgten mechanischen Belastung und der danach gemessenen Heliumdichtigkeit aufgelistet.

Die Werte in Klammern sind mit Vorsicht zu betrachten, da bei diesen Prüfkörpern die Schwankungen der Messwerte eine Auswertung der Gewichtszunahme schwierig machen. Fasst man die restlichen Werte in einer Matrix sortiert nach mechanischer Belastung und Rohrlänge zusammen, und beachtet analog zu Kapitel 6.3.1.3 die Wassermenge, die durch die zwei in Einzelaufbauten untersuchten Dichtstrecken in den Komposit-Hohlisolator eingedrungen sind, so ergibt sich

Tabelle 6.7: Ergebnisse der mechanisch vorbelasteten Prüfkörper.

Rohr- länge	Anord- nung	Wand- dicke	Kam- mer	mech. Belastung	He-Leckrate mbar l/s	Gewichts- anstieg
lang		dick	1	5 000 · 1,0 MML	$10^{-7} - 10^{-8}$	2,6 mg/h
lang		dick	1	500 · 1,35 MML	$10^{-7} - 10^{-8}$	2,0 mg/h
lang		dick	1	5 000 · 1,0 MML	$10^{-7} - 10^{-8}$	1,8 mg/h
kurz	unten	dick	1	5 000 · 1,0 MML	$10^{-6} - 10^{-8}$	1,7 mg/h
kurz	oben	dick	1	5 000 · 1,0 MML	$10^{-6} - 10^{-8}$	1,3 mg/h
kurz	oben	dick	2	5 000 · 1,0 MML	$1,7 \cdot 10^{-5}$	3,4 mg/h
kurz	unten	dick	2	500 · 1,35 MML	$> 10^{-4}$	(1,0 mg/h)
lang		dick	2	500 · 1,35 MML	$10^{-7} - 10^{-8}$	2,5 mg/h
lang		dick	2	5 000 · 1,0 MML	$10^{-7} - 10^{-8}$	(3,8 mg/h)
kurz	unten	dick	4	500 · 1,35 MML	$> 10^{-4}$	2,2 mg/h
kurz	oben	dick	4	500 · 1,35 MML	$10^{-7} - 10^{-8}$	1,8 mg/h
lang		dick	4	5 000 · 1,0 MML	$10^{-7} - 10^{-8}$	(2,3 mg/h)

Tabelle 6.8: Ergebnisse der mechanisch vorbelasteten Prüfkörper in Matrixform bezogen auf die mechanische Vorbelastung und die Rohrlänge, abzüglich der Wassermengen durch Deckel und Durchführung.

	5 000 · 1,0 MML	500 · 1,35 MML
lang	1,5 mg/h ($10^{-7} - 10^{-8}$ mbar l/s) 0,7 mg/h ($10^{-7} - 10^{-8}$ mbar l/s)	0,9 mg/h ($10^{-7} - 10^{-8}$ mbar l/s) 1,4 mg/h ($10^{-7} - 10^{-8}$ mbar l/s)
kurz, unten	0,6 mg/h ($10^{-6} - 10^{-8}$ mbar l/s)	1,1 mg/h ($> 10^{-4}$ mbar l/s)
kurz, oben	0,2 mg/h ($10^{-6} - 10^{-8}$ mbar l/s) 2,3 mg/h ($1,7 \cdot 10^{-5}$ mbar l/s)	0,7 mg/h ($10^{-7} - 10^{-8}$ mbar l/s)

die Aufstellung nach Tabelle 6.8. Die festgestellten Helium-Leckraten (siehe Kapitel 4.5.1) sind dabei jeweils in Klammern angegeben.

Betrachtet man die Probekörper mit einer geringen Helium-Leckrate ähnlich der von mechanisch unbelasteten Probekörpern (maximal 10^{-6} mbar l/s), so zeigt sich an den mechanisch vorbelasteten Komposit-Hohlisolatoren, wie auch schon an den neuwertigen, dass in kurze weniger Wasser eindringt als in lange. Ebenfalls entsprechend zu den mechanisch unbelasteten Probekörpern ist dies jedoch mehr als die Hälfte der Menge die in lange Probekörper eindringt. Ebenso unterscheiden sich die Wassermengen, die durch gleichartige Varianten von Prüfkörpern, die unter gleichen klimatischen Bedingungen und in der gleichen Höhe in derselben Prüfkammer gelagert wurden, eingedrungen sind, in diesem Fall um bis zu 50 %. In diesen Punkten bestätigen sich in dieser Untersuchung die Ergebnisse aus Kapitel 6.3.1.3 für neuwertige Prüfkörper.

Im Vergleich der Probekörper mit geringer und erhöhter Helium-Leckrate zeigt sich, dass eine erhöhte Helium-Leckrate mit einer erhöhten eingedrungenen Wassermenge einhergeht.

Die Gegenüberstellung der Werte der mechanisch belasteten Prüfkörper mit denen der mechanisch unbelasteten aus Tabelle 6.6 zeigt Tabelle 6.9. Es fällt auf, dass die eindringenden Wassermengen bei der Untersuchung der mechanisch vorbelasteten Prüfkörper allgemein geringer sind, als bei den mechanisch belasteten. Hierfür gibt es bisher keine logische Erklärung. Im allgemeinen würde man nach einer mechanischen Belastung und damit möglichen Schädigung des Materials höchstens

Tabelle 6.9: Ergebnisse aller dickwandigen Prüfkörper in Matrixform bezogen auf die mechanische Vorbelastung und die Rohrlänge, abzüglich der Wassermengen durch Deckel und Durchführung.

	unbelastet	5 000 · 1,0 MML	500 · 1,35 MML
lang	1,3 mg/h bzw. 2,4 mg/h 3,4 mg/h bzw. 4,7 mg/h	1,5 mg/h 0,7 mg/h	0,9 mg/h 1,4 mg/h
kurz, unten	0,9 mg/h bzw. 3,6 mg/h	0,6 mg/h	1,1 mg/h
kurz, oben	1,8 mg/h	0,2 mg/h 2,3 mg/h	0,7 mg/h

eine Erhöhung, keinesfalls aber eine Verringerung der eindringenden Wassermenge erwarten. Da die Randbedingungen wie Klima und Lagerung in beiden Fällen gleich waren, gibt es bisher nur wenige Erklärungsansätze für dieses Phänomen. Grundsätzlich kann es nur bedeuten, dass

- einer oder mehrere der Bestandteile der Prüfkörper anders gefertigt wurden,
- die Prüfkörper eine andere klimatische Belastung erfahren haben,
- die mechanische Belastung, trotz gegenteiliger Erfahrungen mit GFKs, zu einer Verdichtung des Material geführt haben,
- oder dass die aus der Messtechnik oder prinzipiell auftretenden Fertigungsunterschieden resultierenden Messungenauigkeiten die Schwankungen, die aus den unterschiedlichen Belastungen resultieren, überdecken.

Im einzelnen sind z. B. folgende Ursachen denkbar:

- Da die Probekörper von einem Hersteller gekauft und nicht selbst hergestellt wurden, ist es trotz aller Vorsichtsmaßnahmen nicht auszuschließen, dass die Probekörper unterschiedlichen Fertigungs-Chargen entstammen. Möglicherweise ist hiermit eine der Forschungseinrichtung unbekannte und von uns nicht nachzuweisende Materialänderung einher gegangen, die diese Unterschiede bewirkt.

- Die Probekörper weisen generell auch untereinander starke Schwankungen auf. Möglicherweise ist die Häufung dieser geringen Werte bei mechanisch belasteten Probekörpern Zufall.
- Möglicherweise ist die statistische Absicherung mit lediglich zwei bis vier Prüfkörpern zu gering.
- Es ist möglich, wenn auch unwahrscheinlich, dass die Montage der Probekörper mit Dichtring und Deckel, trotz vorgegebener Anzugmomente, gleicher Dichtringe und gleichem Personal, unterschiedlich ausgeführt wurde und somit unterschiedliche Permeationsmengen durch das Dichtsystem Deckel bedingt.
- Auch die Dichtringe sind gekauft und im Laufe der Untersuchungen ständig neu erworben worden, da eine zu lange Lagerdauer dem Material nicht zuträglich ist. Trotz gleichbleibender Spezifikation der Dichtringe ist nicht auszuschließen, dass herstellerseitig Änderungen, z. B. am Material, vorgenommen wurden, die der Forschungseinrichtung als Kunden nicht bekannt gemacht wurden.

Da die eingedrungene Wassermenge sich jedoch durch die mechanische Belastung nicht signifikant um Größenordnungen verschlechtert hat, ist davon auszugehen, dass sich die mechanische Belastung, zumindest bei den untersuchten dickwandigen Rohren, nicht in hohem Maße auf die Wasserdampfdichtigkeit von Komposithohlisolatoren auswirkt. Genauere Aussagen zum Einfluss der mechanischen Schädigung auf die Wasserdampfdichtigkeit lassen sich mit der gegebenen geringen statistischen Absicherung und den auftretenden material- oder fertigungsbedingten Schwankungen nicht treffen.

6.5 Prüfkörper mit vereinfachtem Versuchsverfahren

6.5.1 Vereinfachung des Versuchsverfahrens

Auf Grund der bisher gemachten Erfahrungen wird das Verfahren zur Untersuchung der Wasserdampfdichtigkeit noch einmal stark vereinfacht. Dabei werden

folgende Punkte gegenüber dem bisherigen, ausgiebigen Verfahren wie folgt vereinfacht:

- Gewichtsmessung der Trockenmittelbeutel

Ursprünglich wurde davon ausgegangen, dass der Verlauf der Wassereinwanderung und damit auch der Wasseraufnahme des Trockenmittels sich im Laufe der Lagerdauer ändern würde. Um diesen Verlauf genau bestimmen zu können und dadurch eventuelle Rückschlüsse auf das Verhalten der Prüfkörper gegenüber dem eindringenden Wasser zu ziehen, wird die Wägung des Trockenmittels bisher täglich vorgenommen (siehe auch Kapitel 4.4.2.1 und Kapitel 6.3). Die Ergebnisse der ersten drei Chargen (siehe auch Kapitel 6.2, 6.3 und 6.4) zeigen jedoch, wie auf Bild 6.6 beispielhaft zu sehen, dass dies nicht der Fall ist. Der Gewichtsanstieg der Trockenmittelbeutel bleibt über den gesamten Verlauf der Messungen, bis hin zu einer Dauer von 7 000 Stunden, linear. Es ist somit nicht notwendig, eine regelmäßige Gewichtsmessung der Trockenmittelbeutel über die Versuchsdauer vorzunehmen. Eine Zweipunktmessung (Wiegung der Trockenmittelbeutel vor dem Einbringen in die Prüfkörper und nach der Entnahme der Prüfkörper) ist ausreichend, um die Gewichtssteigerung und damit die eingedrungene Wassermenge zu bestimmen. Hierzu werden die Trockenmittelbeutel vor dem Einbringen in die Prüfkörper gewogen, sofort in die mit trockener Luft gespülten Prüfkörper gegeben und die Prüfkörper verschlossen und in die Versuchskammern eingelagert. Am Ende der Versuchsdauer werden die Prüfkörper aus den Versuchskammern entnommen, geöffnet, und die darin enthaltenen Trockenmittelbeutel schnellstmöglich gewogen. So kann die insgesamt aufgenommene Feuchtigkeitsmenge bestimmt werden.

In der Zeit zwischen Wiegung und Prüfkörperverschluss bzw. zwischen Prüfkörperöffnung und Wiegung kann Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft aufgenommen werden und das Messergebnis verfälschen. Diese Menge wurde in Kontrollmessungen zu maximal 0,05 g/min bestimmt. Bei schnellem Vorgehen bei der Einlagerung und der Öffnung ist dieser Betrag gering gegenüber den gemessenen Gewichtszunahmen von ca. 2 g bis 4 g. Um diesen Beitrag

weiter zu reduzieren, ist darauf zu achten, den Einlagerungs- und Öffnungsvorgang bei niedriger relativer Luftfeuchte vorzunehmen. Um die Anfangsfeuchte der Prüfkörper zu reduzieren, werden die Prüfkörper vor der Einlagerung bei 80° getrocknet.

- Lagerdauer

Die bisherigen Untersuchungen zeigen, wie im vorherigen Absatz beschrieben, über die Lagerdauer von bis zu 7 000 Stunden keine Änderungen. Somit kann die Lagerdauer verringert werden, ohne den Informationsgehalt zu verringern. Als Kompromiss zwischen kurzer Lagerdauer zur Verkürzung der Versuchszeit und einer ausreichenden Lagerdauer, um aussagekräftige Wägungen der Trockenmittelbeutel zu erlauben, wird ein Zeitraum von 1 000 Stunden gewählt.

- Mechanische Belastung

Die zyklischen mechanischen Belastungen der Prüfkörper führen, wie in Kapitel 6.4 gezeigt, zu keiner Verschlechterung der Wasserdampfdichtigkeit. Die derzeitigen Normen schreiben jedoch vielfach eine statische Belastung der Komposit-Hohlisolatoren vor (siehe auch Kapitel 4.5). Möglicherweise führt diese mechanische Belastung zu einem anderen Ergebnis. Aus diesem Grunde werden auch Prüfkörper untersucht, die einer statischen Belastung ausgesetzt waren. Die statische Belastung wird so gewählt, dass sich möglichst die maximale nach Norm erlaubte bleibende Verformung von 5 % ergibt. Dies ist bei den untersuchten Komposit-Hohlisolatoren je nach Prüfkörper bei einer mechanischen Belastung im Bereich von 2,0 MML bis 2,2 MML der Fall. Auch bei diesen statischen mechanischen Belastungen ist, wie nach den zyklischen Belastungen, eine erhöhte Heliumleckrate messbar.

- Silikonisierte Prüfkörper

Um die bisherigen Aussagen zur Übertragbarkeit der Ergebnisse unsilikonisierter Rohre auch auf silikonisierte (siehe auch Kapitel 6.2.1) zu verifizieren, werden auch silikonisierte Prüfkörper diesem vereinfachten Versuchsverfahren unterzogen.

6.5.2 Messergebnisse

Bei der Lagerung verschiedener Prüfkörper nach diesem vereinfachten Verfahren (siehe Kapitel 6.5.1) ergeben sich die Messwerte nach Tabelle 6.10. Die Werte von unbelasteten Prüfkörpern liegen je nach Ihrer Bauart in den gleichen Bereichen

Tabelle 6.10: Ergebnisse der Prüfkörper nach vereinfachtem Verfahren.

Rohr- länge	Wand- dicke	SiR- Beschirmung	mech. Belastung	Gewichts- anstieg
kurz	dick	ohne	einmalig statisch 2,0 MML	2,1 mg/h
kurz	dick	ohne	einmalig statisch 2,0 MML	2,0 mg/h
kurz	dick	ohne	einmalig statisch 2,2 MML	2,0 mg/h
lang	dick	ohne	einmalig statisch 2,2 MML	2,2 mg/h
lang	dick	ohne	einmalig statisch 2,2 MML	1,7 mg/h
lang	dick	ohne	einmalig statisch 2,2 MML	2,9 mg/h
kurz	dick	ohne	unbelastet	2,0 mg/h
kurz	dick	ohne	unbelastet	2,4 mg/h
kurz	dick	ohne	unbelastet	2,2 mg/h
kurz	dick	ohne	unbelastet	2,3 mg/h
kurz	dick	ohne	unbelastet	2,7 mg/h
kurz	dick	ohne	unbelastet	2,6 mg/h
kurz	dick	ohne	unbelastet	3,2 mg/h
kurz	dick	ohne	unbelastet	2,5 mg/h
kurz	dünn	ohne	unbelastet	3,0 mg/h
kurz	dünn	ohne	unbelastet	2,9 mg/h
kurz	dünn	ohne	unbelastet	3,3 mg/h
kurz	dünn	ohne	unbelastet	3,4 mg/h
lang	dünn	ohne	unbelastet	6,5 mg/h
lang	dünn	ohne	unbelastet	2,6 mg/h
lang	dünn	ohne	unbelastet	2,6 mg/h
lang	dick	ohne	zyklisch 5 000 · 1,0 MML	2,1 mg/h
lang	dick	ohne	zyklisch 5 000 · 1,0 MML	4,9 mg/h
lang	dick	ohne	zyklisch 5 000 · 1,0 MML	4,1 mg/h
lang	dick	mit	zyklisch 5 000 · 1,0 MML	4,7 mg/h
lang	dick	mit	zyklisch 5 000 · 1,0 MML	2,7 mg/h

wie die Werte der Charge 2 (siehe Kapitel 6.3.1). Dies bestätigt, dass dieses vereinfachte Verfahren vergleichbare Werte liefert. Ebenso sind die eindringenden Wassermengen der zyklisch beanspruchten Probekörpern vergleichbar mit den Messergebnissen des ursprünglichen Verfahrens.

Die Rohre, welche eine SiR-Beschirmung aufweisen, zeigen eine Wassereinwanderung, die in den gleichen Bereichen liegt, wie die Wassereinwanderung in gleichartig beanspruchte, aber nicht beschirmte. Insofern bestätigt sich die Annahme aus Kapitel 6.2.1, dass die SiR-Beschirmung die Wassereinwanderung nicht wesentlich verändert.

Bei den statisch belasteten Prüfkörper ist, genau wie bei den zyklisch belasteten, keine Erhöhung der Wassermenge, die in den Prüfkörper eindringt, zu erkennen.

6.6 Zusammenfassung der Messergebnisse

Fasst man die Messergebnisse der abgeschlossenen Versuchsreihen, also der zweiten Charge neuwertiger Prüfkörper (Kapitel 6.3), der mechanisch vorbelasteten Prüfkörper (Kapitel 6.4) und der Prüfkörper mit vereinfachtem Versuchsverfahren (Kapitel 6.5) zusammen, so ergibt sich Bild 6.7. Aus diesem Diagramm lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ziehen:

- Die eindringende Wassermenge erhöht sich bei geringerer Wanddicke.
- In lange Prüfkörper dringt mehr Wasser ein, als in kurze, jedoch nicht mit einem linearen Zusammenhang.
- In silikonisierte Prüfkörper dringen vergleichbare Wassermengen ein wie in nicht silikonisierte.
- Die Schwankungen einzelner Prüfkörper gleicher Bauart untereinander sind zu groß, um weiterreichende Aussagen zu den Wegen, über die das Wasser eindringt, zu treffen.
- Mechanische Vorbelastungen, egal ob zyklisch oder statisch, erhöhen die eindringende Wassermenge nicht.

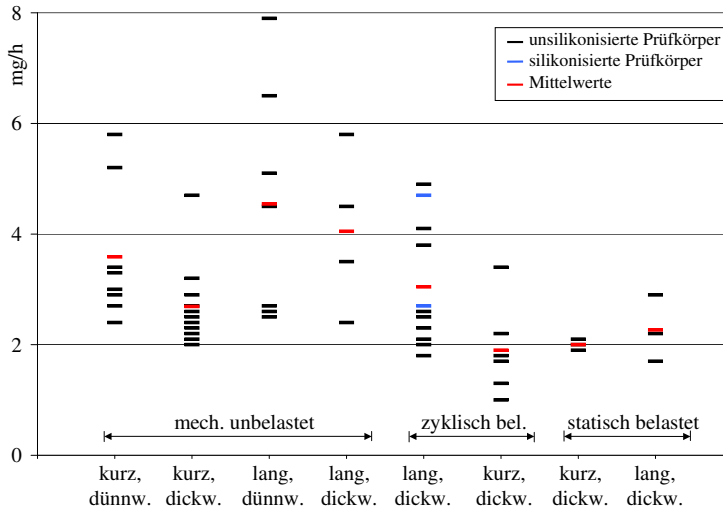


Bild 6.7: Alle Messwerte nach Prüfkörper und mechanischer Belastung getrennt.

Insofern lässt sich feststellen, dass die größte gemessene Wassermenge, die in einen untersuchten Komposit-Hohlisolator eindringt, für ein übliches (dickwandiges) langes Rohr bei 5,8 mg/h liegt. Bei einem entsprechenden Komposit-Hohlisolator mit reduzierter Wanddicke (dünnwandig) ist der maximale Wert mit 7,0 mg/h leicht höher. Mechanisch belastete Komposit-Hohlisolatoren weisen keine höheren Werte an eindringendem Wasser auf.

7 Folgerungen aus den Untersuchungen

Ziel dieser Arbeit ist es, zu untersuchen, ob das in einen Komposit-Hohlisolator eindringende Wasser ein Ausmaß erreicht, das den Betrieb der darin eingebrachten Geräte gefährden könnte. Um dies beurteilen zu können, werden in diesem Kapitel die Ergebnisse aus den Untersuchungen am Gesamtsystem Komposit-Hohlisolator, wie sie in Kapitel 6 dargestellt sind, interpretiert und bewertet. Dazu wird die Beschleunigung des Vorgangs durch die erhöhte Temperatur betrachtet und eine Abschätzung vorgenommen.

7.1 Die Beschleunigung

Wie in Kapitel 3.6 beschrieben wurde, unterliegt der Vorgang der Permeation einer Beschleunigung bei erhöhter Temperatur. Um abschätzen zu können, welche Wassermengen bei einer geringeren als der untersuchten Temperatur in einen Komposit-Hohlisolator eindringen, können einige Berechnungen mit den in Kapitel 3 vorgestellten Beziehungen vorgenommen werden. Die zitierten Formeln sind zwar aus den Fickschen-Gesetzen abgeleitet, die hier nicht vollständig gelten, können jedoch für eine erste Näherung genutzt werden.

Zur besseren Übersicht sind die verwendeten Zusammenhänge hier noch einmal wiedergegeben:

- Die Permeationsmenge an einem Zylinder ergibt sich aus:

$$Q = \frac{2\pi P(T) t \Delta p}{\ln(b/a)} \cdot l \quad . \quad (7.1)$$

- Der Permeationskoeffizient ist temperaturabhängig und berechnet sich aus:

$$P(T) = P_0 \cdot e^{-\frac{E_p}{RT}} \quad . \quad (7.2)$$

- Die Aktivierungsenergie der Permeation berechnet sich aus der Summe der Aktivierungsenergie der Diffusion und der Lösungsenthalpie

$$E_P = E_D + \Delta H_S \quad (7.3)$$

mit Hilfe der Literaturwerte aus Kapitel 3.9.3 von $\Delta H_S = 40 \text{ kJ/mol}$ und $E_{D,\text{GfK}} = 11,6 \text{ kJ/mol}$ zu $E_P = 51,6 \text{ kJ/mol}$.

- Die Partialdruckdifferenz Δp entspricht immer dem äußeren Partialdruck p_a , da im Inneren eine rel. Luftfeuchtigkeit von 0 % herrscht. Der Partialdruck p_x an einem beliebigen Ort berechnet sich aus der relativen Luftfeuchte φ_x an diesem Ort und dem Sättigungsdampfdruck von Wasser p_S bei der entsprechenden Temperatur nach

$$\varphi_x = \frac{p_x}{p_S} \quad . \quad (7.4)$$

Hieraus erkennt man, dass $\Delta p = p_a - p_i = p_a - 0 = p_a = \varphi_a \cdot p_S$.

7.1.1 An dickwandigen Komposit-Hohlisolatoren

Aus den Messungen am Gesamtkomposit-Hohlisolator, die in Kapitel 6.3 dargestellt sind, ergibt sich für den »dickwandigen« Isolator ein größter Messwert von $5,8 \text{ mg/h}$. Obwohl auch wesentlich geringere Mengen gemessen wurden, soll an diesem höchsten eine »worst-case-Betrachtung« durchgeführt werden. Die Messwerte der ersten Charge werden auf Grund der in Kapitel 6.2 beschriebenen Oberflächenveränderungen nicht weiter in Betracht gezogen.

Da der Einsatz von Porzellan-Hohlisolatoren, die ebenfalls einen Dichtring am Flansch aufweisen, problemlos und akzeptiert funktioniert, stellt sich hier auch die Frage, wieviel »mehr« bei einem Kompositisolator ins Innere eindringt. Insofern könnte der angegebene Messwert noch um die ermittelte Leckrate des O-Rings von $0,9 \text{ mg/h}$ reduziert werden. Ebenso wäre die Wassermenge für die Kabeldurchführung von $0,2 \text{ mg/h}$ abzuziehen. Da jedoch z. B. die Leckrate des O-Ringes, wie in Kapitel 5.3 dargestellt wurde, nur mit Einschränkungen ermittelt werden kann-

te, werden die folgenden Rechnungen im Sinne der »worst-case-Betrachtung« so durchgeführt, als würde die gesamte gemessene Wassermenge durch das GFK-Rohr eindringen und aus diesem Vorgang der Permeation herrühren.

Folgende Werte werden für diese Betrachtung benötigt:

GFK-Länge	l	1,495 m
Außendurchmesser	$2 \cdot b$	166 mm
Innendurchmesser	$2 \cdot a$	154 mm
Versuchs-Temperatur	T	353,15 K
Rel. Luftfeuchte außen	φ_a	95 %
Rel. Luftfeuchte innen	φ_i	0 %
Sättigungsdampfdruck von Wasser bei 80 °C	$p_S(80\text{ °C})$	473,75 mbar
allg. Gaskonstante	R	8,314 J/(mol · K)

Mit Hilfe der Gleichung 7.1 lässt sich aus der gemessenen Wassermenge je Zeiteinheit Q/i der temperaturabhängige Permeationskoeffizient für 80 °C zu

$$\begin{aligned}
 P(353,15\text{ K}) &= \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{b}{a}\right)}{2 \cdot \pi \cdot t \cdot \Delta p \cdot l} \\
 &= 5,8\text{ mg/h} \cdot \frac{\ln\left(\frac{83\text{ mm}}{77\text{ mm}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 450,061\text{ mbar} \cdot 1,495\text{ m}} \\
 &= 1,029 \cdot 10^{-4}\text{ mg}/(\text{h} \cdot \text{m} \cdot \text{mbar})
 \end{aligned}$$

berechnen. Hieraus lässt sich dann mit Gleichung 7.2 die temperaturunabhängige Permeationskonstante P_0 berechnen. Für die Aktivierungsenergie wird dabei nach Gleichung 7.3 der gegebene Wert von $E_P = 51,6\text{ kJ/mol}$ angenommen.

$$\begin{aligned}
 P_0 &= \frac{P(80\text{ °C})}{e^{-\frac{E_P}{RT}}} \\
 &= \frac{1,029 \cdot 10^{-4}\text{ mg}/(\text{h} \cdot \text{m} \cdot \text{mbar})}{e^{-\frac{51,6\text{ kJ/mol}}{8,314\text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) \cdot 353,15\text{ K}}}} \\
 &= 4\,416,4\text{ mg}/(\text{h} \cdot \text{m} \cdot \text{mbar})
 \end{aligned}$$

Hat man auf diese Weise die temperaturunabhängige Permeationskonstante P_0 bestimmt, lässt sich mit Hilfe der Gleichungen 7.2 und 7.1 für jede Temperatur und jedes Partialdruckgefälle die eindringende Wassermenge Q berechnen. Für verschiedene Umgebungstemperaturen und relative Luftfeuchten sind diese Werte in Tabelle 7.1 dargestellt und für eine beispielhafte Lebensdauer von 25 und 40 Jahren berechnet.

Es ergeben sich dabei Werte zwischen 0,9 g bei einer Temperatur von 20 °C und einer rel. Luftfeuchte von 50 % und 33,5 g bei einer Temperatur von 40 °C und einer rel. Luftfeuchte von 95 %.

Ein üblicher Trockenmittelbeutel, wie er in dieser Arbeit verwendet wird (Kapitel 4.4.2) erlaubt die Aufnahme von 20 g Feuchtigkeit. Mit zwei Trockenmittelbeuteln würde sich demnach die Wassermenge, die bei einem durchschnittlichen Komposit-Hohlisolator der oben angegebenen Abmessungen gegenüber einem Porzellan-Isolator mehr eindringt, selbst bei einer andauernden Temperatur von 40 °C und einer ständigen relativen Luftfeuchte von 95 % binden lassen.

Es ist noch einmal zu erwähnen, dass die berechneten Werte auf Grund des Nicht-Fickschen-Verhaltens der Permeation am GFK lediglich Anhaltspunkte sind. Auch die Beschleunigungsvorgänge für die Wassermenge, die, wie beim Porzellan-Hohlisolator, über den O-Ring eindringt, und für jene des bisher noch unbekannten Eindringweges (Kapitel 6.3.1.3), werden nicht durch die Fickschen Gesetze dargestellt und sind daher in dieser vergleichenden Berechnung nicht beachtet.

7.1.2 An dünnwandigen Komposit-Hohlisolatoren

Führt man eine solche »worst-case-Betrachtung« für dünnwandige Rohre durch, muss die Berechnung mit dem schlechtesten Wert für dünnwandige Rohre aus Kapitel 6.3 von 7,0 mg/h und der reduzierten Wanddicke durchgeführt werden. Der Innendurchmesser beträgt hier 158 mm. Damit ergibt sich der temperaturunabhängige Permeationskoeffizient zu $P_0 = 3\,508,6 \text{ mg}/(\text{h} \cdot \text{m} \cdot \text{mbar})$. Die sich ergebenden Werte sind in Tabelle 7.2 gezeigt. Die Wassermengen sind hier erwartetermaßen höher. Dies zeigt, dass auch der Faktor der eindringenden Wassermenge bei der Reduzierung der Wandstärke in Betracht gezogen werden muss.

Tabelle 7.1: Abschätzung für die durch das GFK in einen dickwandigen Komposit-Hohlisolator eindringende Wassermenge in der »worst-case-Betrachtung« bei verschiedenen Umgebungstemperaturen.

Ziel- temp. in °C	Ziel- temp. in Kelvin	Permeationsk. der Zieltemp. P(T) in mg/(h*m*mbar)	rel. Luft- feuchte außen	Sättigungsdampfdr. von Wasser bei Zieltemp. in mbar	Permeierende Menge Q/t in 10 ⁻³ mg/h	Permeierte Menge in 25 Jahren in g	Permeierte Menge in 40 Jahren in g
20	293,15	2,821 · 10 ⁻⁰⁶	0,95	23,385	7,846	1,72	2,75
20	293,15	2,821 · 10 ⁻⁰⁶	0,5	23,385	4,130	0,90	1,45
25	298,15	4,024 · 10 ⁻⁰⁶	0,95	31,687	15,163	3,32	5,31
25	298,15	4,024 · 10 ⁻⁰⁶	0,5	31,687	7,981	1,75	2,80
30	303,15	5,672 · 10 ⁻⁰⁶	0,95	42,452	28,636	6,27	10,03
30	303,15	5,672 · 10 ⁻⁰⁶	0,5	42,452	15,072	3,30	5,28
35	308,15	7,907 · 10 ⁻⁰⁶	0,95	56,265	52,908	11,59	18,54
35	308,15	7,907 · 10 ⁻⁰⁶	0,5	56,265	27,847	6,10	9,76
40	313,15	1,091 · 10 ⁻⁰⁵	0,95	73,813	95,738	20,97	33,55
40	313,15	1,091 · 10 ⁻⁰⁵	0,5	73,813	50,388	11,04	17,66

Tabelle 7.2: Abschätzung für die durch das GFK in einen dünnwandigen Komposit-Hohlisolator eindringende Wassermenge in der »worst-case-Betrachtung« bei verschiedenen Umgebungstemperaturen.

Ziel-temp. in °C	Ziel-temp. in Kelvin	Permeationsk. der Zieltemp. $P(T)$ in $\text{mg}/(\text{h} \cdot \text{m} \cdot \text{mbar})$	rel. Luftfeuchte außen	Sättigungsdampfdr. von Wasser bei Zieltemp. in mbar	Permeierende Menge Q/t in 10^{-3} mg/h	Permeierte Menge in 25 Jahren in g	Permeierte Menge in 40 Jahren in g
20	293,15	$2,241 \cdot 10^{-06}$	0,95	23,385	9,469625	2,07	3,32
20	293,15	$2,241 \cdot 10^{-06}$	0,5	23,385	4,984013	1,09	1,75
25	298,15	$3,197 \cdot 10^{-06}$	0,95	31,687	18,300763	4,01	6,41
25	298,15	$3,197 \cdot 10^{-06}$	0,5	31,687	9,631981	2,11	3,38
30	303,15	$4,506 \cdot 10^{-06}$	0,95	42,452	34,561214	7,57	12,11
30	303,15	$4,506 \cdot 10^{-06}$	0,5	42,452	18,190113	3,98	6,37
35	308,15	$6,282 \cdot 10^{-06}$	0,95	56,265	63,85497	13,98	22,37
35	308,15	$6,282 \cdot 10^{-06}$	0,5	56,265	33,607879	7,36	11,78
40	313,15	$8,664 \cdot 10^{-06}$	0,95	73,813	115,545677	25,30	40,49
40	313,15	$8,664 \cdot 10^{-06}$	0,5	73,813	60,813514	13,32	21,31

8 Zusammenfassung und Ausblick

Um die Lebensdauer von Komposit-Hohlisolatoren mit dem teilweise organischen und deshalb nicht wasserdampfdichten Rohrmaterial GFK beurteilen zu können, muss das Gesamtsystem des Komposit-Hohlisolators mit allen Wegen, über die Feuchtigkeit ins Innere eindringen kann, untersucht werden. Neben dem GFK, durch welches Feuchtigkeit ins Innere permeieren kann, sind der O-Ring zwischen Deckel und Armatur und die Kontaktstelle zwischen dem GFK-Rohr und der Armatur die möglichen Eindringstellen für Feuchtigkeit.

Weil die Lebensdauererwartung von Komposit-Hohlisolatoren bis zu 40 Jahre beträgt, müssen diese Untersuchungen zeitraffend durchgeführt werden. Da der Vorgang der Permeation, wie viele andere Prozesse, wärmeaktiviert ist, bietet sich eine Lagerung bei erhöhter Temperatur und maximaler Luftfeuchtigkeit an. Diese wird in einzelnen Versuchskammern für bis zu 8 Prüfkörper bei 80° und 95 % relativer Luftfeuchte realisiert. Für die Messung der Feuchtigkeitseinwanderung wird eine spezielle Versuchstechnik mit Hilfe von in den Komposit-Hohlisolator eingebrachtem Trockenmittel und einer DMS-Waage, die sowohl be- als auch entlastet werden kann, entwickelt.

Es werden sowohl beschirmte als auch unbeschirmte Komposit-Hohlisolatoren mit einer Baulänge von 1,595 m, einem Aussendurchmesser von 166 mm und einer Wandstärke von 6 mm untersucht. Zur Beurteilung der unterschiedlichen Eindringstrecken und des Einflusses der Wandstärke werden zusätzlich Komposit-Hohlisolatoren mit einer Baulänge von 0,83 m und einige mit einer Wandstärke von 4 mm geprüft. Auch die Deckeldichtung und die Messkabeldurchführung werden zusätzlich betrachtet.

Eine erste Charge untersuchter Prüfkörper zeigt während der Untersuchungen ein unerwartetes und unbeabsichtigtes Oberflächenverhalten. Das Harz scheint förmlich zu verlaufen oder zu schmelzen. Die Untersuchungen lassen als Ursache eine

nicht vollständige Vernetzung des Harzes auf Grund von inhibitiertem Härter vermuten. Dieses zeigt deutlich, dass das Einhalten des richtigen Mischungsverhältnisses von Harz und Härter von entscheidender Bedeutung für die Herstellung von Epoxidharz für Komposit-Hohlisolatoren ist. Auch die Silikonbeschirmung kann die Folgen solcher Fertigungsfehler nicht mindern oder gar verhindern.

Die zweite Charge untersuchter Prüfkörper zeigt, dass durch dünnwandige Komposit-Hohlisolatoren mehr Feuchtigkeit ins Innere eindringt als durch dickwandige. Der Zusammenhang lässt sich jedoch auf Grund der hohen Messwertschwankungen nicht genauer beziffern. Auch die Aufteilung der Wasserdampfbeträge auf die verschiedenen Wege, über die Feuchtigkeit ins Innere des Komposit-Hohlisolators gelangen kann, ist auf Grund dieser hohen Streuung der Messwerte nicht möglich. Die Untersuchung der zyklisch mechanisch vorbelasteten Komposit-Hohlisolatoren zeigt keine Erhöhung der eindringenden Wassermenge. Stattdessen ergibt sich sogar eine Verringerung gegenüber mechanisch unbelasteten Komposit-Hohlisolatoren. Hierfür lässt sich jedoch bisher keine Ursache finden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass dies kein ursächlicher Zusammenhang ist, sondern in den Prüfkörpern selbst, oder den Umgebungsbedingungen begründet ist. Eine signifikante Verschlechterung der Wasserdampfdichtigkeit für entsprechend mechanisch vorbelastete Rohre kann somit zumindest im unbelasteten Zustand ausgeschlossen werden.

Auf Grund dieser Untersuchungen wird das Prüfprogramm vereinfacht und verkürzt, was bei den weiteren Probekörpern zu vergleichbaren Ergebnissen führt. Diese Optimierung des Prüfprozesses ist somit erfolgreich und kann für weitere Untersuchungen genutzt werden. In diesem Zuge werden auch statisch mechanisch vorbelastete Prüfkörper untersucht, die ebenfalls vergleichbare Ergebnisse liefern und keine Erhöhung der eindringenden Wassermenge zeigen.

Die Kombination aus nicht exakt regelbarem Klima, Messunsicherheiten bei der Bestimmung der kleinen Messwerte, Schwankungen durch äußere Einflüsse wie z.B. Erschütterungen und der nicht exakten Reproduzierbarkeit des Fertigungsprozesses von Komposit-Hohlisolatoren führt zu einer Schwankung der Messwerte, die es unmöglich macht, genauere Schlüsse aus den gemessenen Werten zu ziehen.

Einige dieser Einflüsse können in zukünftigen Untersuchungen ausgeschaltet werden. So zeigt die vorliegende Arbeit, dass der Einsatz einer großen Klimakammer, in der Temperatur und Luftfeuchte exakt geregelt werden können, dem Einsatz kleinerer und flexiblerer Kammern vorzuziehen ist. Hierdurch besteht zwar die Gefahr, dass bei einem Ausfall der Klimakammer alle Prüflinge betroffen wären, jedoch haben schon kleine Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen zwischen den einzelnen Kammern einen größeren Einfluss auf die Messergebnisse als angenommen und sollten unbedingt vermieden werden. Zur Ermittlung der eingedrungenen Wassermenge sollte, da die Vorteile einer Messung mit Trockenmittel insbesondere im Hinblick auf die weitere Verwertbarkeit der Messergebnisse immens sind, dieses Verfahren auch weiterhin der direkten Messung der Luftfeuchte im Inneren vorgezogen werden. Ein weiterer Punkt, der sich nicht verbessern lässt, sind die Schwankungen der untersuchten Komposit-Hohlisolatoren untereinander. Die Fertigungsverfahren der Prüfkörper, wie das Nasswickelverfahren der GFK-Rohre oder die Ausführung der Klebung und das Zusammenfügen von Rohr und Armatur per Hand, führen zu einer natürlichen Streuung der Messwerte, da keine zwei Rohre gleich sind. Da diese Streuungen, wie sich aus Messwerten schließen lässt, relativ groß sind, muss mit einer wesentlich größeren Anzahl von Prüfkörpern gearbeitet werden. Nur so lassen sich die Fertigungsschwankungen zumindestens durch eine größere Statistik abfangen.

Um trotz der genannten Schwankungen eine Aussage zur Lebensdauer vornehmen zu können, wird in einer »worst-case-Betrachtung« der schlechteste gemessene Wert einer weiteren Auswertung unterzogen. Der größte gemessene Wert eindringender Feuchtigkeit für einen neuwertigen Komposit-Hohlisolator industrieeüblicher Ausführung liegt bei 5,8 mg/h. Rechnet man diesen Wert mit Hilfe der Fickschen Gesetze auf eine Umgebungstemperatur von 40 °C um, wie sie in den Normen als höchste normale Einsatztemperatur beziffert ist, so ergibt sich bei einer Umgebungsfeuchte von 95 % eine eindringende Wassermenge von 33,55 g in 40 Jahren. Diese Menge ist mit kleinen industrieeüblichen Trockenmittelbeuteln gut beherrschbar und führt somit nicht zur Verringerung der Lebensdauer der Geräte.

Literaturverzeichnis

- [ALV 07] Alvarez, V.; Vazquez, A.; De La Osa, O.:
 *Cyclic Water Absorption Behavior of Glass-Vinylester and
 Glass-Epoxy Composites*
 In: Journal of Composite Materials, Band 41, Heft 10, 2007
- [AMS 84] Amsinck, R.:
 *Hollow Composite Insulators for Outdoor Instrument Transformers
 and other Equipment*
 In: Conference Record of 1984 IEEE International Symposium on
 Electrical Insulation, Montreal Canada, June 11-13, 1984
- [ASTM E 96] ASTM E 96:
 Standard Test Methods for Water Transmission of Materials
 American Standard, 1995
- [AVK 04] Kannebley, G. u.a.:
 AVK-Handbuch
 Eigenverlag Arbeitsgemeinschaft Verstärkte Kunststoffe-Technische
 Vereinigung e.V., 2004
- [BAL 80] Balkowski, F. D.:
 Das Diffusionsverhalten von Kunststoffen
 In: Kunststoffe im Bau, Heft 4, Jahrgang 15, 1980
- [CHA 83] Chandler, H.D.; Jones, R.L.; Reynders, J.P.:
 Stress corrosion failure of composite long rod insulators
 In: Tagungsband zum Fourth International Symposium on High
 Voltage Engineering, Athen, 1983
- [CRA 95] Crank, J.:

The mathematics of diffusion

Oxford, Clarendon Press, 1995

- [DIN 51 005] DIN 51 005:
Thermische Analyse (TA); Begriffe
Deutsche Norm, 1993-08
- [DIN 53 122] DIN 53 122 -1:
Prüfung von Kunststoff-Folien, Elastomerfolien, Papier, Pappe und anderen Flächengebilden - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit - Teil 1: Gravimetrisches Verfahren
Deutsche Norm, 2001-08
- [DIN 53 536] DIN 53 536:
Prüfung von Kautschuk und Elastomeren; Bestimmung der Gasdurchlässigkeit
Deutsche Norm, 1992-10
- [DIN EN ISO 62] DIN EN ISO 62:
Kunststoffe - Bestimmung der Wasseraufnahme
Deutsche Norm, 2008-05
- [EHR 92] Ehrenstein, G. W.:
Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften
Hanser München Wien, 1992
- [EHR 81] Ehrenstein, G. W.; Grünewald, R.; Inhoffen, E.; Kleinholz, R.; Neitzel, M.; Nicolaus, W.; Wiedemann, J.:
Glasfaserverstärkte Kunststoffe
expert verlag Grafenau, 1981
- [FLE 95] Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.:
Faserverbundbauweisen - Fasern und Matrices
Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1995
- [GER 02] Gerthsen, C.:
Gerthsen Physik

Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Tokio, 2002

- [HAM 83] Hammer, F.; Weltgen, J.:
Bushings with silicone rubber sheds
In: Tagungsband zum Fourth International Symposium on High Voltage Engineering, Athen, 1983
- [HAU 09] Haupt, H.; Möhring, N.; Hinrichsen, V.; Berger, C.:
High-performance thermosets meet high voltage: mechanical fatigue and permeation of water steam on composite hollow insulators.
In: Tagungsband zur Fourth International Thermoset Conference 2006, Iserlohn, 2006
- [HOL 64] Holleman, A. F.; Wiberg, E.:
Lehrbuch der anorganischen Chemie
Walter de Gruyter & Co. Verlag, Berlin 1964
- [IEC 60721-1] IEC 60721-1:
Classification of environmental conditions - Part 1: Environmental parameters and their severities
Internationale Norm, 2002-10
- [IEC 61462] IEC 61462:
Composite hollow insulators - Definitions, test methods, acceptance criteria and design recommendations
Internationale Norm, 2007-02
- [IEC GUIDE 111] IEC GUIDE 111:
Electrical high-voltage equipment in high-voltage substations - Common recommendations for product standards
Internationale Richtlinie, 2004-07
- [IEC/TS 62073] IEC/TS 62073:
Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces
Internationale Technische Spezifikation, 2003-06

- [INMR] Markets in Development:
Hollow Core Composite Insulators: Will their promise ever be realized?
In: Insulator News and Market Report (INMR) Volume 9, Nr. 2, 2001
- [KÄR 70] Kärner, H.:
Konstruktiver Aufbau, Eigenschaften und Betriebsverhalten eines Kunststoff-Longstabisolators
In: ETZ-A, Band 91, Heft 7, 1970
- [KIN 05] Kindersberger, J.; Bärsch, R.:
Grenzfläche Feststoff-Gas – Beanspruchungen, Wechselwirkungen, Design, Prüfverfahren, Lebensdauer
In: ETG-Fachbericht 99, VDE-Verlag GmbH Berlin Offenbach, 2005
- [KLO 74] Klopfer, H.:
Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen
Bauverlag Wiesbaden und Berlin, 1974
- [KUE 05] Küchler, A.:
Hochspannungstechnik : Grundlagen - Technologie - Anwendungen
Springer Berlin Heidelberg New York, 2005
- [KUM 05 I] Kumosa, L.; Armentrout, D.; Benedikt, B.; Kumosa, M.:
An Investigation of Moisture and Leakage Currents in GRP Composite Hollow Cylinders
In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume 12, No. 5; October 2005
- [KUM 05 II] Kumosa, L.; Kumosa, M.; Armentrout, D.:
Resistance to Brittle Fracture of Glass Reinforced Polymer Composites Used in Composite (Nonceramic) Insulators
In: IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 20, No. 4; October 2005
- [KUN 98] Kunde, K.; Hennings, R.; Kuhl, M.; Schütz, A.; Janssen, H.; Stietzel, U.:

New Experiences with Composite Insulators

15-206, Cigre Session 1998

- [LAW 08] Homepage Lawrie Technology, Inc.:
Darstellung einer typischen Pultrusions-Linie
(Bild-Datei, Stand: 28.09.2008)
URL:<http://www.lawrietechnology.com/pultrusion2.php>
- [MAR 04] Mark, H. F.:
Encyclopedia of polymer science and technology: Volume 9
Wiley-Interscience New York, 2004
- [MEN 02] Menges, G.:
Werkstoffkunde Kunststoffe
Hanser München, Wien, 2002
- [MOE 90] Möckel, J.; Fuhrmann, U.:
Epoxidharze: Schlüsselwerkstoffe für die moderne Technik
verlag moderne industrie Landsberg/Lech, 1990
- [MOE 05 I] Möhring, N.; Haupt, H.; Hinrichsen, V.; Berger, C.:
Wasserdampfdichtigkeit und mechanische Schädigungsgrenzen von Kompositohohlisolatoren
In: ETG-Fachbericht 99, VDE-Verlag GmbH Berlin Offenbach, 2005
- [MOE 05 II] Möhring, N.; Haupt, H.; Hinrichsen, V.; Berger, C.:
Vapor Permeation and Mechanical Damage Limits of Composite Hollow Insulators
In: Proceedings of the 14th ISH, Nr. D-48, 2005
- [MOE 08] Möhring, N.; Haupt, H.; Hinrichsen, V.; Berger, C.:
Wasserdampfpermeation in GFK Rohren
In: ETG-Fachbericht Band 112, VDE-Verlag GmbH Berlin Offenbach, 2008
- [NEO 96] Neogi, P.:
Diffusion in Polymers
Marcel Dekker New York, 1996

- [SCH 93] Schütz, A.:
 Grenzflächenprobleme in faserverstärkten Kunststoffen
 VDI Verlag Düsseldorf 1993
- [SCH 87] Schmitt, W.:
 Kunststoffe und Elastomere in der Dichtungstechnik
 Kohlhammer Stuttgart Berlin Köln Mainz, 1987
- [SCH 75] Schwarz, O.:
 Glasfaserverstärkte Kunststoffe
 Vogel-Verlag Würzburg, 1975
- [SED 02] Sedlbauer, K; Krus, M.:
 Bauphysik: Skript zur Vorlesung der TU-München
 (pdf-Datei, Stand: 11.11.2002) URL: <http://www.bauphysik.de/lehre/tu-muenchen-kr/6-Feuchte.pdf>, Holzkirchen, 2002
- [SEI 98] Seifert, J.:
 Grenzflächen- und Verbundprobleme in mineralisch gefüllten Epoxidharzformstoffen
 Shaker Verlag Aachen, 1999
- [SPA 84] Spaude, R.:
 Korrosion und Alterung von Glasfasern und glasfaserverstärkten Duroplasten
 VDI-Verlag, Düsseldorf, 1984
- [STI 84] Stietzel, U.:
 Untersuchungen zum Einfluß von Feuchtigkeit auf die elektrischen Eigenschaften organischer Isolierstoffe für Freiluft-Hochspannungs-Anwendungen
 Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1984
- [STRI] Swedish Transmission Research Institute (STRI):
 Hydrophobicity Classification Guide
 Guide 1, 92/1

- [USE 99] User Com 10:
User Com 10
Informationsbroschüre, Mettler-Toledo GmbH, 1999
- [VIE 91] Vieth, W. R.:
Diffusion in and through polymers: principles and applications
Hanser München, Wien, New York, Barcelona, 1991
- [WEB 95] Weber, D.:
Technische Feuchtemessung in Gasen und Festkörpern
Vulkan-Verlag Essen, 1995
- [WEL 83] Weltgen, J.:
Freiluft-Durchführungen mit Silikonschirmen
In: ETZ Elektrotechnik + Automation, Offenbach: VDE-Verlag, 1983
- [YAM 81] Yamaguchi, H.:
Water vapor absorption and permeability of epoxy resins
In: IEEE, CH1717-8/81/0000-0159; 1981
- [ZOR 03] Zorn, H.:
Alkaliresistente Glasfasern: Von der Herstellung bis zur Anwendung
CTRS2 Dresden 2003

Anhang

A Bilder der Versuchsaufbauten

A.1 Die Klimakammern

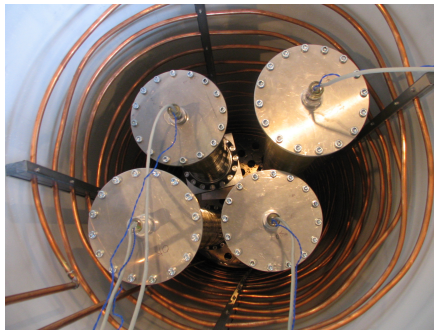


Bild A.1: Der Blick von oben in eine Versuchskammer mit Prüflingen.

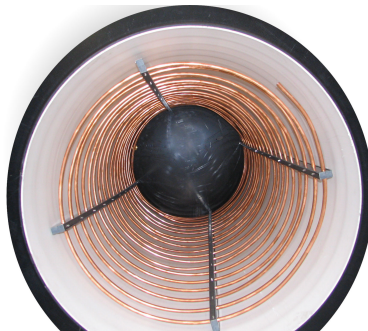


Bild A.2: Die Heizwendel in einer leeren Versuchskammer.



Bild A.3: Die Heizwendel.



Bild A.4: Mehrere Prüflinge auf dem Standtisch im Reservoir beim Darüberheben der Kammer.

A.2 Die Probekörper



Bild A.5: Unsilikonisierter langer Komposit-Hohlisolator.



Bild A.6: Zwei kurze gestapelte Komposit-Hohlisolatoren, einer silikonisiert, einer unsilikonisiert.

A.3 Der servohydraulische Prüfstand



Bild A.7: Komposit-Hohlisolator mit servohydraulischer Prüfmaschine.

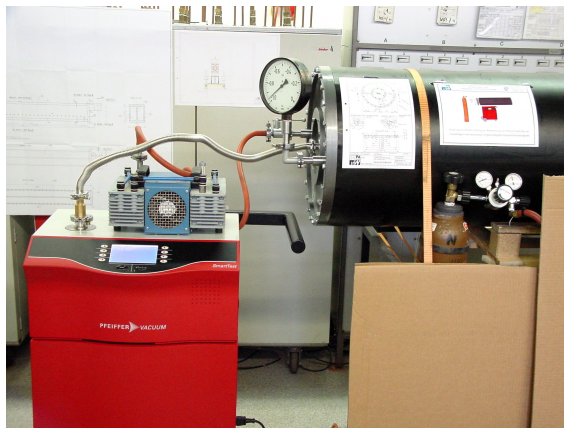


Bild A.8: Integrale Heliumlecksuche.

B Veröffentlichungen

- [1] N. Möhring, H. Haupt, V. Hinrichsen, C. Berger:
Wasserdampfpermeation in GFK-Rohren
ETG Fachtagung "Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen", Würzburg,
16.-17. September 2008; ETG-Fachbericht Band 112, S. 83 - 88, ISBN 978-3-8007-3116-9

- [2] Nicole Möhring, H. Haupt, V. Hinrichsen, C. Berger:
Fatigue testing and permeation of water steam on composite hollow insulators characterised by acoustic emission tests
Proceedings of the 27th European Conference on Acoustic Emission Testing (EWGAE 2006), Cardiff, Wales, UK, September 20th - 22nd 2006. Ed. by R. Pullin ... Switzerland: Trans Tech Publication Ltd., 2006, additional papers, S. 8 - 18. ISBN 0-87849-420-0

- [3] Möhring N., Haupt H., Hinrichsen V., Berger C.:
Wasserdampfdichtigkeit und mechanische Schädigung des Gesamtsystems Kompositohhlisolator
RCC Fachtagung "Werkstoffe für Isolatoren, Überspannungsableiter, Kabelgarnituren, Schaltgeräte in der Hochspannungstechnik", Berlin, 6./7.4.2006

- [4] Hansgeorg Haupt, N. Möhring, V. Hinrichsen, C. Berger:
Hochleistungsduroplaste unter Hochspannung: Mechanisches Ermüdungsverhalten und Wasserdampfpermeation von Komposit-Hohlisolatoren bzw. High-performance thermosets meet high voltage: mechanical fatigue and permeation of water steam on composite hollow insulators
4. Internationale Duroplasttagung Iserlohn / International Thermoset Conference 2006; Iserlohn: ISK, 2006, S. 71 - 78 bzw. S. 171 - 177

- [5] Möhring N., Haupt H., Hinrichsen V., Berger C.:
Vapor Permeation and Mechanical Damage Limits of Composite Hollow Insulators
14th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2005), China, Peking 25.-29.05.2005; Proceedings of the 14th ISH, Nr. D-48, pp. 240

- [6] Möhring N., Haupt H., Hinrichsen V., Berger C.:
Fatigue testing and permeation of water steam on composite hollow insulators made of glass fibre reinforced epoxy resins
XXIII. International Conference Reinforced Plastics 2005, May 24th - 26th 2005, in Karlsbad, S. 205 - 210, ISSN 1214-6412

- [7] Möhring N., Haupt H., Hinrichsen V., Berger C.:
Wasserdampfdichtigkeit und mechanische Schädigungsgrenzen von Komposit-hohlisolatoren
ETG-Fachtagung "Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen", Hanau, 08.-09.03.2005; ETG-Fachbericht 99, S. 133 - 138, ISBN 978-3-8007-2879-4

C Studentische Arbeiten

Folgende Diplomarbeiten (DA) und Studienarbeiten (SA) wurden im Rahmen der Untersuchungen durchgeführt.

Freidinger, Rene

Entwicklung und Inbetriebnahme einer Versuchsanordnung zur Untersuchung der Wasseraufnahme von GFK-Stabmaterial

SA 2006

Schmidtchen, Thomas

Untersuchung der Wasseraufnahme von GFK-Stabmaterial unter Temperatureinfluss

SA 2007

Schmidtchen, Thomas

Untersuchung des Diffusionskoeffizienten von GFK-Rohrmaterial anhand der Wassersorption

DA 2008